

## ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА

**Иркутск 2021** 

#### Российская академия наук

#### Сибирское отделение Институт земной коры СО РАН

Иркутский национальный исследовательский технический университет
Международная ассоциация гидрогеологов
Общероссийская общественная организация Российский союз
гидрогеологов

#### ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА

# МАТЕРИАЛЫ ВСЕРОССИЙСКОГО СОВЕЩАНИЯ ПО ПОДЗЕМНЫМ ВОДАМ ВОСТОКА РОССИИ с международным участием

(XXIII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока)

УДК 556.3+504.43+504.46.06 ББК Д46я431+Д9(2Р5)46я431 П 44

**Подземная гидросфера**: Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. – 604 с.

В сборнике представлены доклады XXIII совещания по подземным водам востока России, посвященного 95-летию со дня рождения выдающегося ученого — главы школы сибирских гидрогеологов — члена-корреспондента РАН, профессора Евгения Викторовича Пиннекера, а также светлой памяти организатора первых совещаний по подземным водам и инженерной геологии Восточной Сибири доктора геолого-минералогических наук, профессора Валентины Георгиевны Ткачук. В нем отражены важнейшие результаты работ, выполненных научными, вузовскими и производственными коллективами не только в области гидрогеологии, но и в сфере инженерной геологии и геокриологии.

Материалы совещания представляют интерес для специалистов-геологов широкого профиля, теоретиков и практиков, а также для аспирантов и студентов.

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

д.г.-м.н. С.В. Алексеев (ответственный редактор)

д.г.-м.н. Л.А. Абукова

д.г.-м.н. Л.П. Алексеева

к.г.-м.н. Л.И. Аузина

д.г.-м.н. А.Г. Вахромеев

д.г.-м.н. В.Е. Глотов

к.г.-м.н. Л.В. Замана

д.т.н. Е.В. Зелинская

д.г.-м.н. А.В. Кирюхин

д.г.-м.н. Е.А. Козырева

д.г.-м.н. Г.Н. Копылова

д.г.-м.н. В.В. Кулаков

д.г.-м.н. О.Е. Лепокурова

к.г.-м.н. Д.А. Новиков

к.г.-м.н. Л.П. Норова

к.г.-м.н. А.Ю. Озёрский

к.г.-м.н. С.Х. Павлов

д.г.-м.н. А.М. Плюснин

д.г.-м.н. С.П. Поздняков

чл.-корр. РАН В.Г. Румынин

д.х.н. Б.Н. Рыженко

д.г.-м.н. Т.Г. Рященко

д.г.-м.н. В.А. Скворцов

д.г.-м.н. И.А. Тарасенко

к.г.-м.н. М.А. Тугарина

д.г.-м.н. Н.А. Харитонова

д.г.-м.н. А.П. Хаустов

д.г.-м.н. В.В. Шепелёв

Особая благодарность нашим спонсорам:



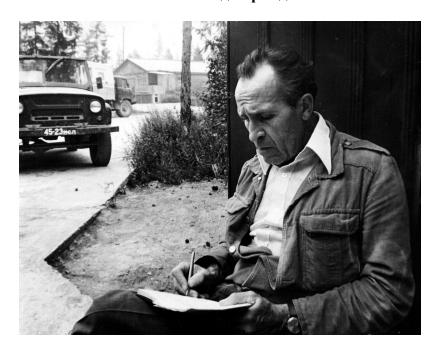






#### ПРЕДИСЛОВИЕ

## ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ ПИННЕКЕР к 95-летию со дня рождения



В июне 2021 г. научная общественность отмечает 95-летие со дня рождения выдающегося ученого с мировым признанием главы сибирской гидрогеологической школы лауреата Государственной премии СССР и премии Совета Министров СССР члена-корреспондента РАН Евгения Викторовича Пиннекера.

С именем Е.В. Пиннекера связано определение гидрогеологии как науки о подземной гидросфере, учения обо всех разновидностях воды земных недр. Сформулированные им научные положения позволили разработать стратегические принципы и методологию теоретической и прикладной гидрогеологии. Е.В. Пиннекер — автор новейшей классификации подземных вод и процессов, формирующих их состав, является одним из пионеров использования изотопных данных для обоснования генезиса подземных вод. Ему принадлежит разработка проблем, касающихся роли воды в геологических процессах, а также экологических аспектов гидрогеологии как составной части охраны окружающей природной среды. Под его руководством открыты и освоены многие месторождения подземных вод Восточной Сибири.

В 1950 г. Е.В. Пиннекер окончил Томский политехнический институт, получив специальность инженера-геолога. В 1955 г. он поступил в аспирантуру в Институт геологии Восточно-Сибирского филиала АН СССР (в настоящее время — Институт земной коры СО РАН) к профессору В.Г. Ткачук. С этого года творческая судьба Е.В. Пиннекера была неразрывно связана с институтом.

В 1959 г. после успешного окончания аспирантуры он защитил кандидатскую диссертацию в Томском политехническом институте на тему «Подземные воды Иркутско-Черемховского промышленного региона». Следующей вехой научной биографии Евгения Викторовича стала защита докторской диссертации «Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна» в 1966 г. во ВСЕГИНГЕО (г. Москва). В 1970 г. Е.В. Пиннекеру было присвоено звание профессора, а в 1990 г. он был избран членом-корреспондентом РАН по Отделению геологии, геофизики и геохимии.

Многие годы Евгений Викторович возглавлял Комиссию по изучению подземных вод Сибири и Дальнего Востока (позднее — Сибирскую секцию Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии). Важнейшими задачами Комиссии являлись координация гидрогеологических, инженерно-геологических и геокриологических исследований в Сибири и на Дальнем Востоке, а также организация и проведение совещаний. Благодаря Евгению Викторовичу совещания стали регулярными, они сплотили гидрогеологов не только нашей страны, но и многочисленных союзных республик.

Е.В. Пиннекер — автор и соавтор более 300 научных работ, в том числе 23 монографий. Под его руководством подготовлено 22 кандидата и 3 доктора наук. Ученики и последователи плодотворно работают в России, странах ближнего и дальнего зарубежья. Неоценима заслуга Евгения Викторовича в создании шеститомной монографии «Основы гидрогеологии», получившей отечественное и мировое признание.

В XXI веке совещания по подземным водам востока России состоялись в Иркутске, Тюмени, Якутске и Новосибирске. Они прошли рамках Государственной целевой программы «Чистая вода». Имя Евгения Викторовича Пиннекера не сходило с уст докладчиков. На совещаниях было отмечено, что активность гидрогеологов в стране существенно возросла. Это еще раз подтвердило всероссийский статус проводимого гидрогеологического форума.

Знаменательному событию — юбилею Евгения Викторовича Пиннекера — посвящено очередное XXIII совещание по подземным водам востока России, которое впервые пройдет на Байкале. Участникам будет предложена книга «Евгений Викторович Пиннекер», изданная в 2006 г. в серии «Наука Сибири в лицах». В нее включено более трех десятков очерковвоспоминаний родных, друзей, коллег, которые близко знали Е.В. Пиннекера и высоко ценили его научный талант и личные качества.

В настоящем сборнике содержится 126 докладов, отобранных редколлегией для публикации. Они охватывают широкий круг теоретических и прикладных проблем гидрогеологии, инженерной геологии и геокриологии. Решение XXIII совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока будет разослано всем участникам, администрациям субъектов РФ, профильным ведомствам, организациям и предприятиям.

Ответственный редактор д.г.-м.н. С.В. Алексеев

## XX, XXI, XXII ВСЕРОССИЙСКИЕ СОВЕЩАНИЯ ПО ПОДЗЕМНЫМ ВОДАМ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА (2012–2018 гг.): РЕТРОСПЕКТИВА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-5-18

Алексеев С.В., Алексеева Л.П.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, salex@crust.irk.ru, lalex@crust.irk.ru

**Аннотация.** В настоящей статье приводится ретроспективный обзор всероссийских совещаний по подземным водам Восточной Сибири и Дальнего Востока с 2012 по 2018 г.

**Ключевые слова:** подземная гидросфера, система «вода-порода», теоретическая и прикладная гидрогеология, природно-технические системы, многолетняя мерзлота, нефтегазоносные бассейны, совещание, участники, Сибирь и Дальний Восток.

**Abstract.** This paper presents a retrospective review of All-Russian Conferences on groundwater of Eastern Siberia and Far East from 2012 to 2018.

**Key words:** ground hydrosphere, water-rock system, theoretical and applied hydrogeology, natural-technical systems, permafrost, oil-gas bearing basins, conference, participants, Siberia and Far East.

XX совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока состоялось в 2012 г. в г. Иркутске и было посвящено 110-летию со дня рождения профессора В.Г. Ткачук, а также светлой памяти члена-корреспондента РАН Е.В. Пиннекера. Оно было организовано Сибирским отделением Российской академии наук, Институтом земной коры СО РАН, Секцией Сибири и Дальнего Востока Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Всероссийским НИИ гидрогеологии и инженерной геологии (ВСЕГИНГЕО), Национальным исследовательским Иркутским государственным техническим университетом, Гидрогеологической и геоэкологической компанией «ГИДЭК», Международной ассоциацией гидрогеологов (МАГ), Общероссийской общественной организацией «Российский союз гидрогеологов» (Росгидрогео), администрацией Иркутской области.

В Оргкомитет совещания поступило 123 доклада, авторами и соавторами которых были 218 человек.

В совещании участвовали представители:

- институтов РАН (Камчатский филиал геофизической службы, Петропавловск-Камчатский; Кольский филиал геофизической службы, г. Апатиты);
- институтов СО РАН (Байкальский институт природопользования, г. Улан-Удэ; Геологический институт, г. Улан-Удэ; Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики, г. Тюмень; Институт геохимии им. А.П. Виноградова, г. Иркутск; Институт земной коры, г. Иркутск; Институт криосферы Земли, г. Тюмень; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, г. Якутск; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Новосибирск; Институт общей и экспериментальной биологии, г. Улан-Удэ; Институт природных ресурсов, экологии и криологии, г. Чита; Институт химической кинетики и горения, г. Новосибирск; Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука г. Томск; Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов, г. Кызыл);
- институтов ДВО РАН (Геологический институт, г. Владивосток; Институт водных и экологических проблем, г. Хабаровск; Северо-Восточный комплексный НИИ, г. Магадан; Чукотский филиал Северо-Восточного комплексного НИИ, Анадырь; Институт вулканологии и сейсмологии, г. Петропавловск-Камчатский; Институт геологии и природопользования, г. Благовещенск; Институт комплексного анализа региональных проблем, г. Биробиджан);
  - институтов УРО РАН (Институт горного дела, г. Екатеринбург);
- институтов Монгольской АН (Институт химии и химической технологии, Институт мерзлотоведения, г. Улан-Батор);
- научно-исследовательских институтов министерств и ведомств (ВСЕГИНГЕО, Московская область, пос. Зеленый; ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург;

СНИИГГиМС, г. Новосибирск; Томский ФГПУ «СНИИГГГиМС»; Томский НИИ курортологии и физиотерапии; Якутнипроалмаз АК «АЛРОСА», г. Мирный);

- производственных геологических объединений И организаций (OAO) «Камчатгеология», г. Петропавловск-Камчатский; OAO «Красноярскгеология», Красноярск; ФГУНПГП «Иркутскгеофизика»; Иркутский филиал 000 Г. «Роснефтьбурение»; Востсибтранспроект, г. Иркутск; ФГУП РосНИИВХ, г. Екатеринбург; ФГУП «Горно-химический комбинат», г. Красноярск; «Ямалнедра», г. Салехард).
- высших учебных заведений (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва; РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва; Университет дружбы народов, г. Москва; Санкт-Петербургский государственный горный институт; Юго-Западный государственный университет, г. Курск; Апатитский филиал Мурманского государственного государственный технического университета; Уральский горный г. Екатеринбург; Оренбургский государственный университет; Пермский государственный научный исследовательский университет; Вологодский государственный технический университет; НИ Томский политехнический университет; Тюменский государственный нефтегазовый университет; НИ Иркутский государственный технический университет; Забайкальский государственный университет, г. Чита; Якутский филиал Байкальского государственного университета экономики и права, г. Якутск; Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск; Амурский государственный университет ФГБОУ ВПО, г. Благовещенск; Худжандский госуниверситет, г. Худжанд (Таджикистан); China University of Geosciences, Wuhan);
- научно-производственных управлений и других организаций (Гидрогеологическая и геоэкологическая компания (ЗАО «ГИЛЭК»), г. Москва: Камчатскбургеотермия, пос. общественная Термальный; Общероссийская организация «Российский союз г. Москва; Центр моделирования геосистем, г. Улан-Удэ; гидрогеологов», OAO «ВНИИЗАРУБЕЖГЕОЛОГИЯ», г. Москва; ООО «Аква», г. Елизово; ООО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии и разработки», г. Тюмень; ООО «Лаборатория экологических проблем», г. Чита; Амурское отделение филиала «ДВ РЦ ГМСН ФГУГП «Гидроспецгеология», Γ. Благовещенск; Забайкальский территориальный государственного мониторинга состояния недр, г. Чита; Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины; Тункинский национальный парк, пос. Кырен, Республика Бурятия; ООО АРКАДИС-Рус, г. Москва; Управление по недропользованию по Красноярскому краю, г. Красноярск; ЗАО «МОНИТЭК», Красноярск; НПП «ТрансИГЭМ», г. Москва; ЗАО «Аква-Т», г. Москва; ООО Горнодобывающая компания «Голд», г. Реж; Клуб спелеологов «Арабика», г. Иркутск; ОАО «Центрально-Кольская экспедиция», г. Мончегорск; Merck Millipore, Москва – Новосибирск; ООО «Примгидрогео», с. Вольно-Надеждинское; курорт «Аршан», с. Аршан; ООО «Лаборатория аржаанологии и туризма», г. Кызыл; Институт карстоведения и спелеологии при ПГУ Русского географического общества, г. Пермь; Центр гидрометеорологической службы при Кабинете министров Узбекистана, г. Ташкент).

В пленарных и 5 секционных заседаниях приняло участие **132** человека (**2** академика РАН, **2** члена-корреспондента РАН, **20** докторов наук, **35** кандидатов наук и **16** молодых ученых до **35** лет). Число иногородних участников совещания составило **90** (рис. 1).

Был заслушан 81 доклад, из них 12 молодых ученых, 9 сообщений рассмотрено методом стендовой демонстрации. Все поступившие материалы докладов опубликованы в сборнике: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России (XX совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – Иркутск: Изд-во ООО «Географ», 2012. 576 с.



Рис. 1. Участники Двадцатого совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (Иркутск, 2012 г.).

Представленные на совещании доклады по тематике касались теоретических и прикладных проблем гидрогеологии. На совещании работало 5 секций: эволюция подземной гидросферы в природных и техногенных условиях; проблемы геохимии подземных вод; региональные гидрогеологические исследования, ресурсы подземных вод; использование и охрана подземных вод; новые подходы и методы в изучении подземных вод.

Участники совещания отразили в своем Решении следующие положения.

Основной обсуждавшейся проблемой на совещании стала подземная гидросфера — особая материальная природная система, характеризуемая неразрывным единством с окружающей природной средой и охватывающая все разновидности воды земных недр. Ее ресурсы — один из источников жизнеобеспечения человечества питьевой водой и важнейший фактор природного регулирования питания рек.

Участники совещания констатировали актуальность и высокий уровень прошедшего научного обсуждения современных научных, методологических и прикладных проблем гидрогеологии. Проводимые по инициативе В.Г. Ткачук гидрогеологические форумы полностью себя оправдали. Их организацию следует продолжить с прежней периодичностью один раз в три года.

Знаменательным событием для гидрогеологического сообщества России в год проведения совещания явилось избрание Аркадия Романовича Курчикова членом-корреспондентом РАН по нефтегазовой гидрогеологии. Участники совещания выразили надежду, что усилия членов РАН В.Г. Румынина и А.Р. Курчикова будут способствовать решению важнейших гидрогеологических проблем на территории Российской Федерации.

В ряду организационных вопросов было предложено:

- обратиться в Роснедра с предложением о подготовке Государственной программы по обеспечению населения чистой природной питьевой (поверхностной и подземной) водой и привлечении для выполнения программы научных подразделений системы РАН. Ответственными за реализацию обращения назначить члена-корреспондента РАН А.Р. Курчикова, докторов геол.-мин. наук Б.В. Боревского, В.В. Куренного, В.М. Матусевича, С.Л. Шварцева, С.В. Алексеева;
- оказать содействие ВСЕГИНГЕО в проведении второй Международной научнопрактической конференции «Питьевые подземные воды. Изучение, использование и информационные технологии»;
- обратиться в Федеральную службу по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды России (Росгидромет) и Федеральное агентство водных ресурсов (Росводресурсы) с требованием об обеспечении доступности заинтересованным научным подразделениям к гидрометеорологическим, гидрологическим, гидрогеологическим данным, полученным за государственный счет в результате проведения мониторинга состояния поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем, питьевых, минеральных, теплоэнергетических, промышленных подземных вод, гидрогеодеформационного поля и показателей нарушенности геологической среды на территории РФ;
- инициировать создание Федеральной целевой программы по разработке и применению технологий использования геотермальной энергии в России;
- поддержать инициативу ГУП «Камчатскбургеотермия» о пересмотре природоохранного законодательства с целью существенного увеличения возможностей практического использования геотермальной энергии;
- уделить особое внимание подготовке молодых специалистов и научных кадров высшей квалификации, внедрению современных методов моделирования в образовательный процесс высших учебных заведений, без чего невозможно дальнейшее поступательное развитие гидрогеологии как науки.

За лучший доклад среди **молодых участников** совещания почетными грамотами и ценными подарками награждены **П.А. Шолохов** (ИЗК СО РАН), **Я.В. Садыкова** (ИНГГ СО РАН), **И.Д. Митрофанов** (СВКНИИ ДВО РАН). Почетная грамота и специальный приз были

вручены молодому исследователю из Китая **Yuan Liao** (China University of Geosciences, Wuhan).

На совещании было отмечено, что важнейшую роль в подготовке научных кадров сыграли специализированные советы по защитам докторских диссертаций Д 003.022.01 при Институте земной коры СО РАН, Д 212.269.03 при НИ Томском политехническом университете, Д 212.273.05 при Тюменском государственном нефтегазовом университете. Таким образом, созданная Е.В. Пиннекером сибирская гидрогеологическая школа продолжает развиваться и крепнуть.

Участники XX совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока выразили благодарность Оргкомитету, а также спонсорам за проведенную работу и оказанную финансовую поддержку.

XXI Всероссийское совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока проводилось в 2015 г. в Якутске в рамках Государственной целевой программы «Чистая вода» на 2010–2015 гг. Оно было посвящено 60-летию организации подобных форумов и светлой памяти члена-корреспондента РАН Е.В. Пиннекера. Организаторами совещания являлись Сибирское отделение Российской академии наук, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Институт земной коры СО РАН, Государственный комитет по инновационной политике и науке РС(Я), Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Ленское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов, Комитет по геологии и недропользованию РС(Я), Академия наук РС(Я), АК «АЛРОСА» (ОАО), Департамент по водным отношениям РС(Я), Секция Сибири и Дальнего Востока Научного Совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Гидрогеологическая и геоэкологическая компания «ГИДЭК», ВСЕГИНГЕО, Международная ассоциация гидрогеологов (МАГ), Общероссийская общественная организация «Российский союз гидрогеологов» (РОСГИДРОГЕО).

В Оргкомитет совещания поступило 122 доклада, авторами и соавторами которых были 267 человек.

В совещании участвовали представители:

- институтов СО РАН (Институт земной коры, г. Иркутск; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, г. Якутск; Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Новосибирск; Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Тюмень; Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Томск; Институт природных ресурсов, экологии и криологии, г. Чита);
- институтов ДВО РАН (Дальневосточный геологический институт, г. Владивосток; Институт водных и экологических проблем, г. Хабаровск; Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт, г. Магадан; Институт вулканологии и сейсмологии, г. Петропавловск-Камчатский; Тихоокеанский институт географии, г. Владивосток);
  - институтов УРО РАН (Институт горного дела, г. Екатеринбург);
- производственных объединений и организаций, научно-производственных управлений и других научных организаций (Территориальный Центр «Эвенкиягеомониторинг», г. Красноярск; Территориальный Центр «Тюменьгеомониторинг», г. Тюмень; ОАО «Красноярская горно-геологическая компания», г. Красноярск; ЗАО «ГИДЭК», г. Москва; ГУ ГГП РС(Я) «Якутскгеология», г. Якутск; Якутнипроалмаз АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный; Академия наук РС(Я), г. Якутск;
- государственной власти (Ленское бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов; Государственный комитет  $PC(\mathfrak{R})$  по геологии и недропользованию; Государственный комитет  $PC(\mathfrak{R})$  по инновационной политике и науке; Министерство охраны природы  $PC(\mathfrak{R})$ ; Департамент по водным отношениям  $PC(\mathfrak{R})$ ;



Рис. 2. Участники Двадцать первого совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (Якутск, 2015 г.).

Министерство здравоохранения  $PC(\mathcal{A})$ ; Департамент по недропользованию по Центрально-Сибирскому округу, г. Красноярск; Главы районных администраций  $PC(\mathcal{A})$ , г. Якутск);

высших учебных заведений (Уральский государственный горный университет, научно-исследовательский Екатеринбург: Иркутский технический университет; Забайкальский государственный университет, г. Чита; Национальный минеральносырьевойуниверситет «Горный», г. Санкт-Петербург; Московский государственный им. М.В. Ломоносова; Санкт-Петербургский государственный университет; Пермский государственный научный исследовательский университет; Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск; Томский политехнический университет; Тюменский государственный нефтегазовый университет; State Key Laboratory of Frozen Soils Engineering (SKLFSE), Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute (CAREERI), Chinese Academy of Sciences (CAS), Lanzhou, China; Fukushima University, Fukushima, Japan; Kyung Hee University, Seoul, South Korea).

География участников из Российской Федерации: города Анадырь, Владивосток, Екатеринбург, Иркутск, Красноярск, Магадан, Мирный, Нерюнгри, Москва, Новосибирск, Пермь, Петропавловск-Камчатский, Санкт-Петербург, Томск, Тюмень, Хабаровск, Чита, Якутск, поселки Депутатский, Хандыга и др. (рис. 2). Зарубежные участники: Япония, Южная Корея, Китай.

В пленарных и секционных заседаниях приняло участие **120** человек. Число иногородних участников совещания составило **55**. Было заслушано **59** докладов, из них **14** – молодых ученых, **7** докладов рассмотрено методом стендовой демонстрации.

Все поступившие материалы докладов опубликованы в сборнике: Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXI Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием). – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2015. – 552 с.

На совещании работало пять секций: подземные воды криолитозоны: состояние и перспективы изучения, разведки и использования; эволюция гидрогеологических систем в условиях изменяющегося климата и техногенных воздействий; взаимодействие подземных вод с горными породами и поверхностными водами; региональные гидрогеологические исследования, гидрогеология нефтегазоносных областей; использование и охрана подземных вод; а также два круглых стола: проблемы подготовки кадров в области гидрогеологии; о проблемах использования подземных вод в Республике Саха (Якутия).

На пленарном заседании было заслушано семь докладов, касающихся фундаментальных вопросов формирования и эволюции подземной гидросферы, проблем нормативно-правового регулирования недропользования при изучении и добыче подземных вод, геохимических особенностей промышленных рассолов Сибирской платформы, геофлюидодинамических процессов в районах развития вулканической активности. Широко обсуждались пути решения государственной программы «Чистая вода» и проблемы использования подземных вод для питьевых, лечебных и промышленных целей.

Участники совещания отразили в своем решении следующие положения:

- повышение эффективности изучения и использования подземных вод требует значительной корректировки нормативно-правовой базы на основе законодательного закрепления их принадлежности к полезным ископаемым, разделения компетенций между законом «О недрах», Водным кодексом и другими законодательными актами;
- оптимальным инструментом упорядочения и гармонизации правовых норм различных отраслей законодательства является подготовка специального федерального закона (либо кодекса) «О подземных водах»;
- при гидрогеологическом изучении недр с целью питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения необходимо переведение пробуренных водозаборных скважин в эксплуатационные независимо от категории оцененных запасов;

- в решениях программы «Чистая вода» предусмотреть выделение финансовых средств для обустройства водозаборных узлов;
- мониторинг подземных вод при разработке их месторождений должен включать в себя оценку геолого-гидрогеологических и геоэкологических условий, регулирование, а также кратко-, средне- и долгосрочный прогноз режима эксплуатации подземных вод;
- следует подготовить гидрогеологическое обоснование мероприятий по созданию резервных источников питьевого водоснабжения крупных городов Сибири и Дальнего Востока, основанных на использовании экологически чистых, защищенных от загрязнения пресных подземных вод;
- обратиться в Правительство PC(Я) с обоснованием необходимости обеспечения питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения различных муниципальных образований Якутии за счет использования подземных вод и финансовой поддержки для расширения поисково-разведочных гидрогеологических работ;
- обратить внимание Правительства  $PC(\mathcal{H})$  и администрации Дальневосточного  $\Phi O$  на слабое использование природных бальнеологических ресурсов: минеральных вод, грязей и торфа для лечебных и профилактических целей и на необходимость совершенствования маркетинговой политики и поддержки предпринимателей, занимающихся розливом и реализацией минеральных вод, изготовлением бальнеологических препаратов из лечебных грязей и торфа;
- активизировать целенаправленные научно-исследовательские и поисковоразведочные работы на подземные воды, используемые в качестве возможного источника тепловой энергии (термальные подземные воды) и нетрадиционного гидроминерального сырья (промышленные подземные воды);
- ознакомить Правительство  $PC(\mathfrak{R})$  с готовыми для промышленной реализации комплексными технологиями переработки важнейшего сырья XXI века дренажных рассолов кимберлитовой трубки Удачная («жидкой руды») в целях получения литий-бромных концентратов и разнообразной попутной продукции с низкой себестоимостью.
- в целях подготовки высококвалифицированных специалистов-гидрогеологов необходимы интеграция высшего образования, науки и производства, инновационно-ориентированное обучение студентов, эффективное использование материального и интеллектуального потенциала НИИ и производственных организаций, проведение совместных научных исследований по приоритетным направлениям;
- рекомендовать вузам, осуществляющим подготовку специалистов гидрогеологического направления, создавать базовые кафедры в профильных научных и производственных организациях.

За лучшие доклады среди молодых участников XXI совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока в возрасте до **35** лет Почетными грамотами и ценными подарками награждены **А.Ф. Жирков** (ИМЗ СО РАН, г. Якутск), **Л.А. Гагарин** (ИМЗ СО РАН, г. Якутск), **Я.В. Садыкова** (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск), **А.М. Тарбеева** (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва), **Л.С. Лебедева** (ИМЗ СО РАН, г. Якутск).

Участники совещания констатировали актуальность и высокий уровень прошедшего обсуждения современных научных, методологических и прикладных проблем гидрогеологии. Проводимые с 1955 г. по инициативе сибирских гидрогеологов В.Г. Ткачук и Е.В. Пиннекера гидрогеологические форумы полностью себя оправдали. Их организацию следует продолжить с прежней периодичностью.

Участники XXI совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока выразили благодарность Оргкомитету, руководству Республики Саха (Якутия), а также спонсорам за проведенную работу и оказанную финансовую поддержку.

**XXII** Всероссийское совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока состоялось в г. Новосибирске в 2018 г. Организаторы совещания: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Институт земной коры СО РАН,

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Секция Сибири и Дальнего Востока Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии; Международная ассоциация гидрогеологов (МАГ), Общероссийская общественная организация «Российский союз гидрогеологов» (РОСГИДРОГЕО).

В Оргкомитет совещания поступило 103 доклада, авторами и соавторами которых были 283 человека.

В совещании участвовали представители 79 организаций:

- институтов РАН (Геологический институт, г. Москва; Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, г. Москва; Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский; Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН, г. Архангельск, Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева, г. Санкт-Петербург);
- институтов СО РАН (Институт водных и экологических проблем, г. Барнаул; Институт земной коры, г. Иркутск; Институт химической кинетики и горения им. В.В. Вернадского, г. Новосибирск; Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева, г. Новосибирск; Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Новосибирск; Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского, г. Новосибирск; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, г. Якутск; Геологический институт, г. Улан-Удэ; Институт природных ресурсов, экологии и криологии, г. Чита; Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Томск; Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, г. Тюмень;
- институтов ДВО РАН (Дальневосточный геологический институт, г. Владивосток; Тихоокеанский океанический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток; Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило, г. Магадан; Институт вулканологии и сейсмологии, г. Петропавловск-Камчатский; Институт водных и экологических проблем, г. Хабаровск; Институт тектоники и геофизики, г. Хабаровск; Институт морской геологии и геофизики, г. Южно-Сахалинск);
- институтов УРО РАН (Институт горного дела, г. Екатеринбург; Оренбургский научный центр, г. Оренбург);
- производственных объединений и организаций, научно-производственных управлений и других научных организаций (АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный; Екатеринбургское отделение ЗАО «ГИДЭК», г. Екатеринбург; ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр», г. Ижевск; АО «Иркутское электроразведочное предприятие», г. Иркутск; Иркутский территориальный государственный центр мониторинга геологической среды, г. Иркутск; ООО «Гелиос», г. Иркутск; ООО «Иркутская нефтяная компания», г. Иркутск; ПАО «Верхнечонснефтегаз», г. Иркутск; ООО «ТЦ «Эвенкиягеомониторинг», г. Красноярск; «Красноярская горно-геологическая компания». Красноярск: OAO ЗАО «ГИДЭК», г. Москва;; АО «СНИИГГиМС», «Экосупервайзер», г. Красноярск; г. Новосибирск; ООО «Новосибгеомониторинг», г. Новосибирск, Управление энергетики и водоснабжения, г. Новосибирск; ООО «Уренгойбурвод», г. Новый Уренгой; ООО «Норильскгеология», г. Норильск; АО «Омская геологоразведочная экспедиция», г. Омск; АО «КамНИИКИГС», г. Пермь; ООО «Лаборатория неразрушающего контроля», г. Пермь; ФГБУ «Пятигорский государственный НИИ курортологии» ФМБА России, г. Пятигорск; АО «Северо-Западное ПГО», г. Санкт-Петербург; ФГБУ «ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского», г. Санкт-Петербург; ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Санкт-Петербург; ЭПАМ г. Санкт-Петербург; Научный парк СПбГУ, г. Санкт-Петербург; Сибирский федеральный научно-клинический центр ФМБА России, г. Томск; Сибирский региональный центр ГМСН филиал ФГБУ «Гидроспецгеология», г. Томск; ООО «Газпром геологоразведка», г. Тюмень;

ГУПТО ТЦ «Тюменьгеомониторинг», г. Тюмень; Научно-исследовательский институт медико-социальных проблем и управления Республики Тыва, г. Кызыл; АО «Камский научно-исследовательский институт комплексных исследований глубоких и сверхглубоких скважин», г. Пермь; Вилюйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Удачный; Подземный рудник «Удачный» АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Удачный; Государственное предприятие «Монгол ус», г. УланБатор, Монголия.);

- государственной власти (Департамент по недропользованию по Центрально-Сибирскому округу, г. Красноярск);
- высших учебных заведений (Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул; Алтайский государственный аграрный университет, г. Барнаул; Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток; Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск; Иркутский государственный университет, г. Иркутск; Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва; Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, г. Новосибирск; Северо-Восточного институт (филиал) федерального Технический университета им. М.К. Аммосова, г. Нерюнгри; Омский государственный технический университет, г. Омск; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь; Институт карстоведения и спелеологии Пермского университета, г. Пермь; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск; Забайкальский государственный университет, г. Чита; Институт подземных вод холодных регионов Университета Хэйлунцзян, г. Харбин, Китай; Российско-Таджикский (славянский) университет, г. Душанбе, Республика Таджикистан; Институт экологических проблем гидросферы при Оренбургском госуниверситете, г. Пермь);

– академий наук зарубежных государств (Институт геологических наук Вьетнамской академии наук и технологий, г. Ханой, Вьетнам).

География участников из Российской Федерации: города Архангельск, Барнаул, Владивосток, Екатеринбург, Ижевск, Иркутск, Красноярск, Кызыл, Магадан, Москва, Мирный, Новосибирск, Новый Уренгой, Норильск, Нерюнгри, Омск, Оренбург, Пермь, Петропавловск-Камчатский, Пятигорск, Санкт-Петербург, Томск, Тюмень, Удачный, Улан-Удэ, Хабаровск, Чита, Южно-Сахалинск, Якутск (рис. 3).

Зарубежные участники: Республика Беларусь, Республика Таджикистан, Китайская Народная Республика, Социалистическая Республика Вьетнам, Монгольская Народная Республика.

В пленарных и секционных заседаниях приняло участие 138 человек. Число иногородних участников совещания составило 64. Было заслушано 62 доклада, из них -19 молодых ученых; 41 доклад рассмотрен методом стендовой демонстрации.

Все поступившие материалы докладов опубликованы в сборнике: Подземные воды Востока России: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXII совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием, Новосибирск, 18—22 июня 2018 г.) — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. — 580 с. Труды совещания прошли регистрацию в системе РИНЦ (http://elibrary.ru).

Представленные на совещании доклады по тематике касались теоретических и прикладных проблем гидрогеологии. На совещании работало 4 секции: фундаментальные проблемы гидрогеохимии; фундаментальные проблемы гидрогеологии; вопросы промысловой гидрогеологии; использование и охрана подземных вод.

На пленарном заседании было заслушано пять докладов, касающихся фундаментальных вопросов формирования и эволюции подземной гидросферы, проблем нормативно-правового регулирования недропользования при изучении и добыче подземных



Рис. 3. Участники Двадцать второго совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (Новосибирск, 2018 г.).

вод, геохимических особенностей промышленных рассолов Сибирской платформы, механизмов формирования состава подземных вод северных районов Западной Сибири.

Участники совещания отразили в своем решении следующие положения и рекомендовали:

Министерству природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральной службе по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, опираясь наопыт советского периода и современные достижения гидрогеологической фундаментальной науки и практики;

- разработать долгосрочную программу по обеспечению всего населения нашей страны чистой качественной водой;
- повысить требования к качеству питьевой воды и ужесточить методы государственного контроля качества подземных вод, используемых для питьевого водоснабжения в соответствии с действующими в России санитарными правилами и нормами;
- разработать новую концепцию обращения с твердыми отходами горнодобывающих предприятий, предотвращающую загрязнение подземных вод;
- уделять повышенное внимание разработке новых методов оценки глобальных планетарных и локальных воздействий на формирование ресурсов подземных вод и их химического состава на основе многолетних мониторинговых исследований в связи с резкими климатическими изменениями и ростом техногенной нагрузки на среду обитания человека;
- обеспечить меры государственного контроля по недопущению сокращения числа пунктов режимных гидрогеологических, метеорологических и гидрологических наблюдений, особенно имеющих многолетнюю историю;
- разработать методику прогнозирования изменения качества питьевых подземных вод на основе сопоставления результатов прогнозов при разведке и данных эксплуатации, специальных теоретических, методических и экспериментальных исследований.

Министерству науки и образования России

- уделить особое внимание подготовке специалистов по водохозяйственным проблемам и гидрогеологии в вузах и средних специальных учебных заведениях России, особенно в регионах, где сложилась кризисная ситуация с высокой заболеваемостью и смертностью из-за использования некачественной питьевой воды;
- включить в программу фундаментальных научных исследований государственных академий наук РФ следующую позицию: «Геофлюидомеханика условий формирования и эксплуатации стратегически важных углеводородных, гидротермальных, магматогенных и вулканогенных месторождений»;

#### РОСГИДРОГЕО

– взять под строгий контроль вопрос о снабжении населения России чистой водой и обеспечить государственную поддержку этой социально-важной проблемы России;

Федеральному и региональным центрам государственного мониторинга состояния недр

— повысить доступность первичных материалов (многолетних режимных наблюдений за уровнем, водоотбором и химическим составом подземных вод) региональной сети мониторинга для заинтересованных научных, учебных и производственных организаций путем создания электронных баз данных и Web-сервисов.

За лучшие доклады среди **молодых участников** XXII совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока в возрасте до 35 лет дипломами I степени и ценными подарками награждены: С.В. Федорова (ИМЗ СО РАН им. П.И. Мельникова), К.В. Сесь (ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука), А.К. Семинский (ИЗК СО РАН).

Дипломами II степени награждены: **А.В. Черных** (ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука), **И.В. Буддо** (ИРЭП, ИЗК СО РАН), **П.О. Воронин** (ИВиС ДВО РАН), **Е.В. Зиппа** (ТФ ИНГГ СО РАН им. А.А. Трофимука).

Участники совещания констатировали актуальность и высокий уровень прошедшего научного обсуждения современных научных, методологических и прикладных проблем гидрогеологии. Проводимые с 1955 г. по инициативе сибирских гидрогеологов В.Г. Ткачук и Е.В. Пиннекера гидрогеологические форумы полностью себя оправдали. Их организацию и проведение следует продолжить с прежней периодичностью и привлечением более широкого круга специалистов, работающих в области гидрогеологической науки и практики в бывших советских республиках.

Участники XXII совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока выразили благодарность Оргкомитету, руководству Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, а также спонсорам за успешное проведение совещания и оказанную финансовую поддержку.

#### Немного статистики

Рекордное (97) количество организаций, в том числе иногородних, направило своих специалистов на IX совещание, проходившее в 1979 г. в Петропавловске-Камчатском (рис. 4), а рекордным по количеству участников было III совещание (1961 г.), в работе которого приняло участие 265 представителей от 85 организаций различных ведомств.

Более 200 ученых и практиков подали доклады на IV, V, VI, IX, более 150- на VII, VIII, X, XI и более 100- на XII, XIII, XV и XIX, XX, XXI и XXII совещания.

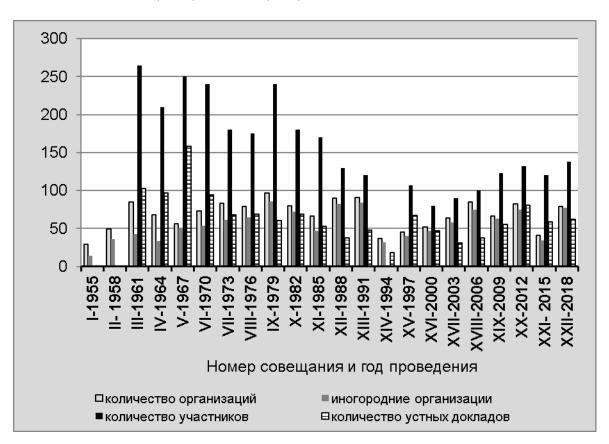


Рис. 4. Количественные характеристики совещаний по подземным водам Сибири и Дальнего Востока.

158 устных докладов сделали гидрогеологи на V совещании, прошедшем в Тюмени в 1967 г. Минимальное их количество (только 18) было заслушано и обсуждено в год тревожных политических потрясений России на XIV совещании. До 37 снизилось число организаций, направивших своих сотрудников в Иркутск.

Тем не менее жизнь гидрогеологии как науки в Сибири и на Дальнем Востоке не остановилась. Благодаря усилиям Е.В. Пиннекера, его коллег и учеников ситуацию удалось

переломить. И уже в 1997 г. в Тюмени собралось более 100 специалистов научно-исследовательских и производственных организаций.

В XXI в. активность гидрогеологов существенно возросла, что еще раз подтвердило всероссийский статус проводимого гидрогеологического форума. Начиная с 2000 г. отчетливо видна тенденция увеличения числа участников совещания, приближающегося к цифре 150.

Таким образом, Иркутск продолжает оставаться центром, объединяющим ведущих ученых и практиков, а созданная Е.В. Пиннекером сибирская гидрогеологическая школа не теряет своего высокого статуса.

Авторы благодарны всем фотокорреспондентам, памятные снимки которых использованы при подготовке настоящей статьи.

#### КАК НАМ ОРГАНИЗОВАТЬ УПРАВЛЕНИЕ ВОДНЫМ ХОЗЯЙСТВОМ РОССИИ?<sup>1</sup>

Богомолов Ю.Г., Голубев С.М., Ладыгин В.Ф.  $Poc\Gamma u\partial po\Gamma eo$ , Mocква, rosgidrogeo-union@mail.ru

Аннотация. В статье предлагается способ создания единой водохозяйственной структуры в Российской Федерации на базе капитализации поверхностного и подземного стока. В рамках единого централизованного управления предлагается финансирование отрасли осуществлять за счет отдельной строки бюджета страны и поэтапно формируемого специального водного фонда с наполнением его за счет введения дополнительных (но обоснованных) платежей водопользователей за воду как за ресурс и страховых платежей от землепользования на паводкоопасных территориях.

Ключевые слова: капитализация, водный ресурс, экологическое право, водный фонд.

**Abstract.** The article proposes a way to create a single water management structure in the Russian Federation based on the capitalization of surface and groundwater runoff. Within the framework of a single centralized management, it is proposed to finance the industry at the expense of a separate line of the country's budget and a gradually formed special water fund with filling it through the introduction of additional (but justified) payments of water users for water as a resource, and insurance payments from land use in flood-prone areas.

**Key words:** Capitalization, water resource, environmental law, water fund.

Согласно определению ООН, «кризис водных ресурсов – это, прежде всего, кризис управления».

Анализ и оценка современного состояния водных объектов России и, что более важно, - динамики нарастания малорегулируемого негативного антропогенного воздействия на водные объекты и ресурсы, а также прогнозируемое изменение климатических условий формирования водных ресурсов с нарастанием частоты и мощности негативного воздействия требуют введения единого и строгого государственного управления вод, безусловно, водным фондом страны и оперативного управления финансовыми ресурсами отрасли. Эффективное управление водным фондом, сочетающим экономические, хозяйственные, экологические и социальные интересы не только настоящего, но и будущих поколений, требует соответствующей над/межотраслевой структуры, нормативно-правовыми, хозяйственными, научными, проектными, контрольными экспертными функциями в отношении водопользования. В современной системе государственного управления это должна быть структура по типу федерального министерства. Необходимость ee создания поддерживается практически профессиональным сообществом специалистов – водохозяйственников и научных работников страны и подтверждается практикой управления водными ресурсами наиболее развитых зарубежных стран.

Интересно, что некоторые разногласия отмечаются и внутри профессионального сообщества специалистов водного хозяйства, заключающиеся в вопросе — как убедительнее сформулировать и обосновать высшему руководству страны необходимость создания единой централизованной государственной структуры управления водным фондом России? (что в условиях оптимизации структур управления отраслями стало традиционно и для ряда других отраслей). При этом необходимо учитывать, что создание такой структуры неизбежно вызовет определенное противодействие со стороны как региональных органов власти, так и и отраслевых «оптимизированных» структур водопользователей и лоббистских групп ввиду ограничения области и возможности принятия ими соответствующих управленческих решений, преодолеть которые, вероятно, возможно лишь на уровне высшего руководства страны и Федерального Собрания.

Особую сложность управления внутренним водным фондом представляют трансграничные водные объекты страны. Поверхностные и подземные водные объекты, которые пересекают границу между двумя или более иностранными государствами или по которым пролегает государственная граница РФ, являются международными

<sup>1</sup> Ред.: публикуется в авторском варианте.

трансграничными (пограничными) водными объектами. А с учетом предоставленной социально-экономической самостоятельности субъектам  $P\Phi$  во внутригосударственных водных отношениях к ним можно также отнести объекты, водосборная территория которых расположена в границах двух или более субъектов  $P\Phi$ .

Сложившаяся к сегодняшнему дню практика показала, что хозяйственноуправленческие функции и принятие решений о реализационных мероприятиях выполняют административные власти соответствующих уровней на местах с привлечением бюджетных (как правило, субсидий или кредитов), внебюджетных средств и инвестиций, в первую очередь в собственных (субъектных), а не государственных интересах. При этом водные и природоохранные службы, как практически не имеющие бюджетного финансирования, осуществляют лишь контролирующие функции и условное согласование (часто вынужденно) планируемых администрациями мероприятий, а служба мониторинга оперативного состояния водных ресурсов возложена на Росгидромет и собственников. В результате администрациями субъектов РФ предоставляется доминирующее право и условия пользования водными и земельными ресурсами водного фонда (в т.ч. и на затапливаемых паводками поймах рек) хозяйствующим субъектам и частному сектору, дающим наибольшие налоговые отчисления в региональные бюджеты и финансовые поступления от продажи (аренды) земель, часто в ущерб комплексному многоотраслевому водопользованию и экологии.

Водные ресурсы России пока не оценены, отсутствует основа экологического права в государстве. Капитализация поверхностного и подземного стока Российской Федерации обеспечит устойчивый экономический и экологический баланс на евроазиатском пространстве. Обладая огромным ресурсом, энергетическим и интеллектуальным потенциалом, Российская Федерация способна, взяв на себя неизбежные риски, минимизировать вызовы XXI века в водном секторе страны.

#### ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАМОЧНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РЕСУРСОВ ООН К ПОДЗЕМНЫМ ВОДАМ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-21-25

#### Виноград Н.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург nv.70@hotmail.com

Аннотация. Рабочая группа по подземным водам была создана в 2019 г. в рамках Группы экспертов по управлению ресурсами (EGRM) Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН). В группу вошли 22 специалиста-гидрогеолога из 13 стран, представители Международной ассоциации гидрогеологов и других общественных организаций. Рабочей группой создана схема применения рамочной классификации ресурсов ООН (РКООН) к подземным водам и выпущено первое издание Дополнительной спецификации ресурсов подземных вод. Российские эксперты приняли активное участие в обсуждении и разработке этого документа, где во многом использована отечественная модель, оказавшаяся наиболее отвечающей принципам РКООН. В подготовленном документе отражены основные особенности применения РКООН к подземным водам.

**Ключевые слова:** подземные воды, рамочная классификация ресурсов ООН.

Abstract. The Groundwater Working Group was established in 2019 within the framework of the Expert Group on Resource Management (EGRM) of the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). The group includes 22 hydrogeologists from 13 countries, representatives of the International Association of Hydrogeologists and other public organizations. The Working Group has developed a framework for applying the UNFC to groundwater resources, and the first edition of the Supplemental Specifications for Groundwater Resources was released. Russian experts took an active part in the discussion and development of the classification, where the domestic model is used as the most consistent with the UNFC principles in many ways. Main features of the application of UNFC to groundwater are reflected in the prepared document.

Key words: groundwater, United Nations Framework Classification for Resources.

Рабочая группа по подземным водам была создана в 2019 г. в рамках Группы экспертов по управлению ресурсами (EGRM) Европейской экономической комиссии ООН (ЕЭК ООН). EGRM отвечает за дальнейшее развитие Рамочной классификации ресурсов ООН (РКООН) и ее применение к различным видам природных ресурсов. РКООН уже применяется к минералам, нефти, возобновляемым источникам энергии, ресурсам ядерного топлива, проектам закачки для геологического хранения и антропогенным ресурсам. В настоящее время Рабочей группой по подземным водам разрабатывается схема применения РКООН к ресурсам подземных вод.

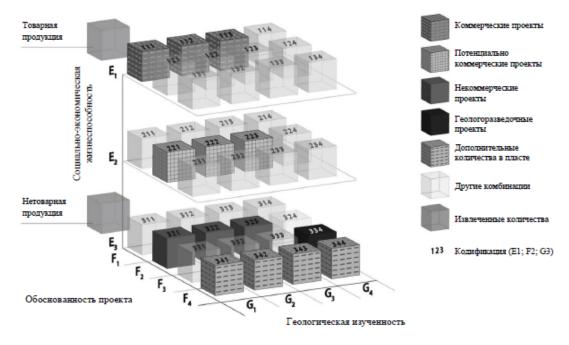
От России в Рабочую группу вошли Н.А. Виноград и А.В. Тудвачев. Цель создания группы – рассмотреть возможность применения РКООН для подземных вод и разработать соответствующий документ. В работе группы принимают активное участие члены Международной ассоциации гидрогеологов, в том числе член Исполнительного совета Теодора Сёчь (Венгрия) и вице-президент ІАН Марко Петитта (Италия), который в 2019 г. стал первым руководителем группы. В 2020 г. группу возглавил президент и главный гидрогеолог компании «Deep Time Advisory Services Ltd.» Кевин Паркс (Канада). В связи с пандемией коронавируса с 2020 г. работа продолжалась в дистанционном формате. Регулярно проходили онлайн-встречи участников с целью выработки возможных подходов к применению ресурсной классификации ООН к подземным водам. В конце 2020 г. завершилась работа по созданию первой редакции документа. В январе 2021 г. документ был передан на экспертизу в Техническую консультативную группу EGRM (TAG EGRM) и получил положительное заключение, были рекомендованы незначительные редакционные поправки, которые внесены в документ. Окончательный вариант (Draft United Nations Framework Classification. Supplemental Specifications for Groundwater Resources) был передан в Секретариат EGRM 29 января 2021 г. для перевода на официальные языки ООН и представления на сессию EGRM. В настоящее время документ опубликован на официальном сайте ООН на английском языке [1]. Предполагается, что первая редакция классификации подземных вод будет утверждена в апреле 2021 г. на сессии EGRM, которая должна состояться в Женеве. После утверждения члены рабочей группы приступят к разработке второй редакции документа и приложений к нему — практики применения новой классификации в странах-участницах рабочей группы.

#### Общие принципы ресурсной классификации ООН

РКООН [2] представляет собой систему, основанную на принципах экологической, социальной и экономической жизнеспособности и технической осуществимости проектов по освоению ресурсов. РКООН создана для решения задач управления ресурсами, выработки ресурсной политики, разработки и осуществления коммерческих проектов добычи природных ресурсов.

Фактически РКООН является универсальной международной схемой устойчивого управления всеми энергетическими и минеральными ресурсами. РКООН создавалась для энергетических ресурсов. Особое внимание уделяется минерально-сырьевым ресурсам, нефти и газу, а в последнее время и возобновляемым ресурсам, таким как солнечная, ветровая и геотермальная энергия [3].

РКООН классифицирует ресурсные проекты на основе трех критериев: экологической и социально-экономической жизнеспособности, технической осуществимости и степени достоверности оценки. Эти критерии оцениваются в трехмерной системе (рисунок). Оценка экологической, социальной и экономической жизнеспособности производится по оси Е, оценка технической осуществимости и зрелости – по оси F, а степень достоверности оценки ресурсов – по оси G. Для оценки по осям E, F и G устанавливаются балльные категории, прописанные в РКООН. Баллы обозначаются числом, например E1, E2 и т.д. Подкатегории могут детализироваться в случае необходимости, например E1.1.



Принципы классификации ресурсов ООН [4].

РКООН определяет трехсторонние комбинации оценок E, F и G как классы и подклассы. Классы присваиваются ресурсным проектам, чтобы кратко описать состояние изученности, доступные ресурсы, экономическую и социальную целесообразность, возможные препятствия на пути реализации проекта.

#### Применение РКООН для подземных вод

РКООН предназначена для применения ко всем ресурсным проектам с целью унификации подходов к оценке различных видов ресурсов. Однако для каждого природного ресурса существуют свои определения и стандарты, принятые специалистами в данной области. Цель дополнительной спецификации по подземным водам состоит в том, чтобы

предоставить гидрогеологам дополнительные технические рекомендации о том, как применять РКООН к проектам, связанным с ресурсами подземных вод. Целевой аудиторией являются специалисты, обладающие соответствующим уровнем знаний и опытом разработки и осуществления проектов по подземным водам и оценки запасов подземных вод. Действительно, оценка подземных вод по категориям Е, F и G РКООН требует некоторых разъяснений, которые и были подготовлены и представлены Рабочей группой по подземным водам.

Эксперты из России, Украины и Казахстана внесли важный вклад в деятельность Рабочей группы, предложив принять за основу нового документа существующие национальные классификации подземных вод. Разделение запасов на категории и группы сложности использовано для категоризации по осям F и G. Для создания преамбулы документа, разработки общих положений и категоризации по оси Е были использованы уже существующие документы по применению РКООН к другим видам ископаемых энергетических и минеральных запасов и ресурсов с разработанными спецификациями [4].

#### Общие принципы оценки подземных вод по категориям Е, F и G

Экологическая, социальная и экономическая жизнеспособность — оценка по оси Е. Согласно РКООН [2], оценка по оси Е производится по следующей схеме: Е1 — разработка и эксплуатация признаны экологически и социально-экономически жизнеспособными; Е2 — ожидается, что разработка и эксплуатация станут экологически и социально-экономически жизнеспособными в обозримом будущем; Е3 — ожидается, что разработка и эксплуатация не станут экологически и социально-экономически жизнеспособными в обозримом будущем, или оценка находится на слишком раннем этапе для определения экологической и социально-экономической жизнеспособности.

Для оценок проектов по подземным водам по оси Е в дополнение к тем, которые содержатся в общей спецификации РКООН, должны учитываться четыре аспекта: степень гидравлической связи с поверхностными водами; наличие взаимовлияния водозаборов, эксплуатирующих один и тот же источник подземных вод; наличие многочисленных небольших водозаборов, которые могут не соответствовать высшим категориям по осям Е, F и G, но являются социально значимыми; наличие проектов добычи других полезных ископаемых, которые сопровождаются извлечением значительных количеств подземных вод (нефтедобыча, осушение горных выработок).

Степень, в которой источник подземных вод находится в гидравлической связи с поверхностными водами, имеет первостепенное значение вследствие фильтрации из поверхностных водных объектов для увеличения производительности водозабора. Добыча подземных вод может изменить водный баланс источников, ручьев, озер, водно-болотных угодий и береговых линий, а также усилить опасные геологические процессы, такие как сейсмичность, оползни или проседание почв, что необходимо также рассматривать в качестве факторов риска.

Когда подземный источник гидравлически не связан с поверхностными водами или с областями питания вследствие большой глубины залегания или наличия абсолютных перекрывающих водоупоров, он будет, по существу, невозобновляемым ресурсом. Обычно такие подземные воды используются для технических целей. Целесообразность эксплуатации в этом случае определяется компромиссом между текущей экономической выгодой и постоянной потерей подземных вод для будущих поколений.

Взаимовлияние водозаборов в зависимости от гидрогеологических условий может приводить к значительным срезкам уровней на соседних водозаборах, необходимости переоценки запасов подземных вод, ухудшению качества воды вследствие нарушения гидродинамического режима и увеличения перетекания, истощению водоносных горизонтов, уменьшению расходов поверхностных водотоков.

Еще один фактор оценки целесообразности освоения подземных вод заключается в наличии многочисленных мелких водозаборов, имеющих социальную значимость, особенно в грунтовых водоносных горизонтах (частные и общественные колодцы, неглубокие

скважины). Такие водозаборы зачастую являются единственным источником воды в регионе; домашние хозяйства, фермы и небольшие поселения используют их для водоснабжения. Национальные законодательные акты по-разному регламентируют права доступа к таким подземным водам в зависимости от исторической практики или общего подхода к проблемам недропользования. Обычно управление их ресурсами разрешительное или отсутствует, особенно при отсутствии альтернативы в виде централизованного водоснабжения. Тем не менее такие водозаборы должны учитываться при оценке по РКООН, так как в совокупности они могут существенно влиять на количество и качество подземных и поверхностных вод.

Наконец, попутные воды нефтяных месторождений и подземные воды, добываемые для осушения шахт и горных выработок, также оказывают влияние как на подземную гидросферу в целом, так и на экологическое состояние поверхностных вод, а, следовательно, их наличие должно учитываться при оценивании проекта разработки по оси Е.

## Техническая осуществимость и совершенство технологий (обоснованность проекта) – оценка по оси F

Согласно РКООН [2], оценка по оси F производится по следующей схеме: F1 — подтверждена техническая осуществимость проекта разработки; F2 — техническая осуществимость проекта разработки подлежит дополнительной оценке; F3 — техническая осуществимость проекта разработки не может быть оценена из-за недостатка технических данных; F4 — проектов разработки нет.

Эксплуатация подземных вод предполагает значительные инвестиции в гидрогеологическую оценку, проектирование скважин и очистку подземных вод. Оценочные баллы по оси F определяются подтверждением наличия и доступности технологии разработки, а также степенью заинтересованности недропользователя в инвестировании, осуществлении и безопасном завершении проекта.

## Степень достоверности оценки количества и качества подземных вод (геологическая изученность) – оценка по оси ${\bf G}$

Оценка по оси G РКООН предназначена для оценки степени достоверности геологической информации и возможности извлечения соответствующих количеств сырья. Согласно РКООН ископаемых энергетических и минеральных запасов и ресурсов, оценка по оси G производится по следующей схеме: G1 — количества, сконцентрированные на известном месторождении, которые можно оценить с высокой степенью достоверности; G2 — количества, отнесенные к известному месторождению, которые можно оценить со средней степенью достоверности; G3 — количества, отнесенные к известному месторождению, которые можно оценить с низкой степенью достоверности; G4 — оцененные количества, отнесенные к потенциальному месторождению, которые основаны главным образом на косвенных данных [4].

Для обоснования оценки проекта по оси G использован отечественный принцип категоризации запасов подземных вод. Оценка по категориям примерно соответствует российской классификации запасов по степени геолого-гидрогеологической изученности и сложности геологического строения и гидрогеологических условий. Так, категории G1 соответствуют запасы категории A месторождений 1-й группы сложности и категории B 2-й группы сложности; категории G2 — запасы категории B месторождений 1-й группы сложности и C1 2–4-й групп сложности; G3 соответствует категориям C1 1-й группы сложности и C2; G4 — прогнозным ресурсам.

Факторы, влияющие на достоверность оценки количества и качества подземных вод, могут включать: долгосрочные показатели эффективности, в том числе объемы добычи и дебиты скважин; непрерывный контроль уровня воды и химического состава в добывающих скважинах, независимый мониторинг подземных и поверхностных вод, почв, экосистем с помощью таких средств, как дистанционное зондирование; стабильность климата или устойчивость перед лицом возможного изменения климата; сложность гидрогеологических и геологических условий на участке; доказательства отсутствия опасных изменений геологической среды при добыче подземных вод; наличие единой, хорошо обоснованной

прогнозной гидрогеологической интерпретации результатов эксплуатационных и мониторинговых наблюдений, подкрепленной соответствующими расчетами и численным моделированием; наличие геостатистически полных и точных гидравлических и геологических данных при проектировании, эксплуатации и прогнозировании ресурсов. План работы группы на 2022–2023 гг.

В январе 2021 г. EGRM обнародовала перспективный план работы всех подразделений на 2022–2023 гг. Группа экспертов EGRM через свою Рабочую группу по ресурсам подземных вод разработает документацию, которая позволит управлять ресурсами подземных вод посредством РКООН и Системы ресурсного менеджмента ООН (СРМ ООН) в соответствии с Повесткой дня на период до 2030 г. и в поддержку Десятилетия действий ООН. Рабочая группа по подземным водам будет работать под руководством Технической консультативной группы (ТАG EGRM) и будет отчитываться перед Бюро EGRM в период между ежегодными сессиями. Предстоит работа по подготовке спецификаций, подробных руководящих принципов и тематических исследований по применению РКООН и СРМ ООН к ресурсам подземных вод. Ожидаемые результаты включают завершение этой работы, а также представление примеров передовой практики применения РКООН к ресурсам подземных вод и тематических исследований.

#### Список литературы:

- 1. Draft United Nations Framework Classification for Resources. Supplemental Specifications for Groundwater Resources/ECE/ENERGY/GE.3/2021/12. https://unece.org/sites/default/files/2021-02/ECE-ENERGY-GE3-2021-12%20Draft%20Groundwater%20Specs final.pdf. Дата обращения 7.03.2021.
- 2. Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН), 2020. Рамочная классификация ресурсов Организации Объединенных Наций обновленный вариант 2019 года. Серия публикаций ЕЭК по энергетике, № 61. ООН, Женева.
- $https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/publ/1922546\_R\_ECE\_ENERGY\_125\_WEB.pdf.\ Дата обращения 7.03.2021.$
- 3. Виноград, Н.А. Результаты деятельности рабочей группы по подземным водам Группы экспертов по управлению ресурсами Европейской экономической комиссии ООН. в: Недропользование. XXI век. 2020 ; № 1(83). стр. 20-23.
- 4. Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН), 2013 Рамочная классификация Организации Объединенных Наций ископаемых энергетических и минеральных запасов и ресурсов 2009 года, включая спецификации для ее применения. Серия публикаций ЕЭК по энергетике, № 42. ООН, Нью-Йорк и Женева. https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210043373/read. Дата обращения − 7.03.2021.

## ЭВОЛЮЦИЯ НАУЧНЫХ ВЗГЛЯДОВ Е.В. ПИННЕКЕРА НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЛОГИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-26-33

#### Хаустов А.П.

Российский университет дружбы народов, Москва, khaustov-ap@rudn.ru

Аннотация. На основе анализа научных трудов Е.В. Пиннекера и личных контактов представлена эволюция отношения к зарождающимся проблемам взаимодействия техносферы и подземной гидросферы с 70-х годов прошлого столетия. Затрагиваются проблемы терминологии, роли подземных вод в общем водоснабжении, изменения качественного состава, охраны подземных вод в различных условиях, гармонии отношений человека с природой. Подземная гидросфера рассмотрена преимущественно как компонента геологической среды. По мере становления гидрогеоэкологии возрастает внимание к перечисленным и другим экологическим проблемам в научных трудах Е.В. Пиннекера. Обсуждаются вопросы эволюции гидрогеологических систем.

**Ключевые слова:** подземная гидросфера, техногенез, гидрогеоэкология, защита и использование подземных вод.

**Abstract:** Based on the analysis of the scientific works of E.V. Pinneker and personal contacts, the evolution of attitudes to the emerging problems of interaction between the technosphere and the underground hydrosphere since the 70s of the last century is presented. The problems of terminology, the role of groundwater in the general water supply, changes in the qualitative composition of groundwater, their protection in various conditions, and the harmony of human relations with nature are discussed. The underground hydrosphere is considered mainly as a component of the geological environment. With the formation of hydrogeoecology, there is an increase in attention to these and other environmental problems in the scientific works of E. V. Pinneker. The evolution of hydrogeological systems is discussed.

**Keywords**: underground hydrosphere, technogenesis, hydrogeoecology, protection and use of groundwater.

Моя деятельность в лаборатории подземных вод Института земной коры СО АН СССР началась в ноябре 1970 г. в рамках темы ГКНТ «Оценка естественных ресурсов подземных вод юга Восточной Сибири». Лаборатория быстро разрасталась не только численно, но и за счет нового оборудования, и в какое-то время число сотрудников превысило 50 человек. Расширялась и тематика исследований. Однако гидрогеоэкологические проблемы не были в приоритете, хотя Б.М. Шенькманом и другими сотрудниками проводились исследования по изменению гидрогеологической обстановки в районе ангарских водохранилищ, организации водозаборов, подтоплению объектов, а также выполнялись и другие работы экологической направленности.

Кроме этого, был начат розлив минеральной воды «Иркутская» из скважины в районе станция Олха, где проводился мониторинг химического состава воды. Преимущественно данным видом работ занимался Ю.И. Кустов и гидрохимики под непосредственным руководством Евгения Викторовича. В это же время был создан кабинет газового анализа, сотрудники которого на основе хроматографии определяли состав растворенных и свободных газов с помощью современного прибора «Цвет».

На одном из ученых советов возник «больной» вопрос о внедрении научных результатов. Директор института чл.-корр. АН СССР М.М. Одинцов, поставив на стол две бутылки минеральной воды «Иркутская», объявил, что это настоящее внедрение лаборатории Пиннекера, и пояснил, что этой воды разливается в 500-тысячном Иркутске более 2 млн бутылок в год. Надо было видеть гордое лицо Евгения Викторовича! А когда он добавил, что Иркутск, пожалуй, единственный город в Сибири, где так активно идет розлив минеральной воды, и что ее большое потребление — это признак культуры населения, зал зааплодировал.

Позже автор этих строк участвовал в организации первого розлива байкальской воды в г. Слюдянке на предприятии ОРСа ВСЖД. Это было в начале 70-х годов. Инициатива бутилирования воды шла от начальника ОРСа. Он привез бутыль воды и попросил сделать анализ. Было лето, все находились в разъездах, и я случайно оказался в лаборатории. Аргументация розлива была конкретна: при остановках поездов дальнего следования многие

пассажиры бегут на Байкал, чтобы испробовать воды, а она у берега грязная. Люди опаздывают на поезда, или происходит их задержка. Руководство станции решило начать розлив воды. Мощности были, хотя выгоды от такого мероприятия никто не ожидал. Я отдал пробу на анализ, позже рассказал об этом Евгению Викторовичу и организовал встречу с начальником ОРСа. Если бы мы представляли по тем временам, в какую проблему «вляпались»! Все упиралось в то, что Байкал цветет, и надо как-то подавлять микрофлору. Необходим более точный и расширенный (в том числе микробиологический) анализ на возможные загрязнители. Но это были «цветочки», главное, надо было получить разрешение местных, областных и отраслевых органов на розлив воды и обосновать технические условия. Проблему цветения можно было устранить насыщением углекислотой в темных бутылках, в стабильности состава мы не сомневались. Анализы проводились через определенные промежутки времени. Но главная проблема была в том, что на розлив пресных вод в СССР не было ГОСТа, он был только на минеральные воды. За рубежом такая практика бутилирования была давно, и мы даже знали, что литр хорошей пресной воды в торговой сети США стоит около 1 доллара.

Тем не менее Учитель «завелся», и свернуть его с пути было очень трудно. Я снова съездил в Слюдянку, отобрал несколько проб, провел консервацию воды и анализ нестойких компонентов, сдал пробы в местную санэпидстанцию (как и в Иркутске). Параллельно отдал пробы в гидрохимическую лабораторию университета, ну и, естественно, своим гидрохимикам. Когда были получены официальные заключения и достоверные данные, мы обратились в областные органы власти. Железнодорожники так же активно на основе наших анализов пытались получить разрешение по своим каналам и связям. В результате почти годовых усилий было получено разрешение на розлив, хранение и реализацию воды в течение трех суток. Затем, после всяких просьб и аргументаций, срок увеличили до семи дней. Это было смешно и грустно. Тогда Евгений Викторович пригласил корреспондента центральной газеты «Правда» в Иркутске и поведал ему о наших бедах и стараниях. Через несколько дней на первой полосе (что очень удивительно, там обычно печаталась официальная информация ЦК КПСС) была опубликована короткая заметка о том, что впервые разливается байкальская вода, но короткие сроки хранения мешают повсеместной реализации. Воду, уже на свой страх и риск, начали разливать небольшими партиями, и даже определились с ценой бутылки 0.5 литра в 17 копеек. Учитель подарил корреспонденту бутылки с кедровой шишкой и видом Байкала. Корреспондент был в шоке от такого подарка, он думал, что все находится на стадии фантазий. Это был лучший аргумент.

После публикации все завертелось с огромной скоростью, мгновенно было получено разрешение на трехмесячный срок реализации воды. Она появилась в магазинах городов Иркутской области и на многих станциях ВСЖД. Это была крупная экологическая победа, которой Евгений Викторович гордился. В то же время он не в полной мере осознавал, что, приложив огромные усилия, первым в СССР дал «зеленый свет» на бутилирование пресных вод, пусть и не подземных. Но это Байкал — мировой стандарт качества вод, «светлое око Сибири», объект мирового наследия и т.д. Многие пассажиры и туристы раскупали воду как сувенир. Теперь эти проблемы кажутся не столь впечатляющими. Иркутск изобилует различными типами минеральных вод (во многом заслуга Е.В. Пиннекера и Ю.И. Кустова), а розлив байкальской воды поставлен на индустриальную основу.

Теперь обратимся к теоретическим изысканиям Евгения Викторовича. В области охраны подземных вод термина «гидрогеоэкология» тогда не существовало. Он был предложен в 1992 г. Н.И. Плотниковым с соавторами «...как новое прикладное направление в гидрогеологии, являющееся частью геоэкологии и одновременно социальной экологии» (цитируется по [1]). Хочется отметить, что в то время (да и сейчас) под социальной экологией понималось все что угодно. Чаще всего принимается, что эта научная дисциплина рассматривает взаимоотношения социальных групп в сфере природопользования.

Первое крупное обобщение проблем охраны подземных вод Восточной Сибири от загрязнения было сделано Евгением Викторовичем совместно с Б.М. Шенькманом в

специальной статье в 1974 г. [2]. Было установлено, что загрязнение подземных вод и зоны аэрации южных регионов Сибири зависит от ее мощности и сезонного характера выпадения осадков. Отметим, что в статье впервые указано на роль почв как профилактического фильтра и на слабую сорбцию загрязнителей в пределах развития карбонатных пород. Лучшая защищенность подземных вод выявлена в песчаниках, особенно в песчаноглинистых отложениях. Отмечено, что широкое площадное распространение имеют такие виды поллютантов, как нефтепродукты, ядохимикаты, азотистые соединения и другие вещества. Такой приоритетный перечень загрязнителей подземных вод верхних горизонтов актуален и сейчас, но дополняется такими загрязнителями, как метилированные формы ртути, диоксины, полициклические ароматические углеводороды и др.

Необходимо заметить, что Евгений Викторович в этот период активно увлекся теоретическими проблемами гидрогеологии, и некоторые его выводы были во многом спорны. Так, он утверждал, что гидрогеология должна заниматься только свободными гравитационными водами, а другие физические категории вод, по А.Ф. Лебедеву, изучаются другими науками. Позже, при написании монографии и анализе агрегатных состояний воды, возможностей комплексообразования в подземной гидросфере, он изменил свои взгляды. Большую роль в прогрессе исследований системы «вода — породы» сыграл молодой томский ученый С.Л. Шварцев. Он довольно часто приезжал в Иркутск и устраивал дискуссионные семинары. Его понятия о равновесно-неравновесном состоянии обозначенной выше системы сыграли огромную роль в формировании научной гидрогеохимической «платформы» Е.В. Пиннекера.

Удивительно, что в статье [2] акцентируется внимание на роли почв как естественного фильтра, хотя почвенную влагу не относят к подземной гидросфере, но с почв начинается формирование вод зоны насыщения. Также были спорны понятия защищенности и уязвимости подземных вод. Всеми признавалось, что мощность и строение зоны аэрации определяют эти свойства. Следовательно, зона аэрации во многом определяет количественный и качественный состав инфильтрующихся вод и является важнейшей компонентой гидрогеологических систем.

Проблемам охраны подземных вод было посвящено всего 0.5 страницы в монографии «Проблемы региональной гидрогеологии» [3]. Я случайно купил два экземпляра в Ленинграде, будучи в командировке. Евгений Викторович в знак благодарности один вручил мне с дарственной надписью. Он даже не знал, что она вышла из печати, хотя и с нетерпением ожидал авторские экземпляры. Книга очень помогла при подготовке к сдаче кандидатского экзамена (я уже в то время был аспирантом третьего года) и чтении лекций студентам ИГУ и ИПИ. В монографии много внимания уделено проблемам гидрогеохимии и направлениям развития региональных гидрогеологических исследований, а это теоретический и методологический каркас современной гидрогеоэкологии. Книга явилась продуктом многочисленных дискуссий на семинарах лаборатории подземных вод ИЗК и, в большей степени, выступлений и прений на хабаровском, новосибирском и улан-удэнском совещаниях по подземным водам Сибири и Дальнего Востока.

При подготовке докладов (особенно пленарных) собиралась и обрабатывалась обширная гидрогеологическая информация по сибирским и дальневосточным геологическим управлениям. На этой основе Евгений Викторович, как председатель Комиссии по подземным водам Сибири и Дальнего Востока, делал пленарный доклад. Сравнивались производственные показатели за трехлетний период между совещаниями. Выявлялись слабые и сильные стороны, достижения и недостатки. Критика была доброжелательной и носила рекомендательный характер. Затем следовали доклады гидрогеологов и маститых ученых. Несмотря на некоторую «неакадемичность» докладов сибирских и дальневосточных гидрогеологов-практиков, Учитель всегда включал их в повестку совещаний. Многие обозначенные в них проблемы решались в кулуарах и на секциях, были обращения к административным органам по тем или иным (в том числе финансовым) вопросам. Специальных секций по охране подземных вод не было, но эти направления всегда были в центре внимания.

Знаю, сколько трудов надо вложить в подготовку совещаний, поскольку был ученым секретарем Первого Всесоюзного совещания по подземным водам востока СССР в г. Петропавловске–Камчатском в 1979 г. На фотографии – одна из научных экскурсий на Камчатке на интереснейший гидрогеологический объект – кальдеру Узон (рисунок).



Е.В. Пиннекер показывает формы проявления кольцевой гидрогеохимической зональности кальдеры непосредственно у термального сероводородного выхода подземных вод. На фото слева направо: Л.С. Язвин, С.В. Лысак, Б.И. Писарский Е.В. Пиннекер (трое – аспиранты В.Г. Ткачук), А.П. Хаустов, Г.М. Шпейзер, И.С. Зекцер.

В 1979 г. Евгением Викторовичем в издательстве «Наука» была издана небольшая по объему, рассчитанная на широкий круг читателей книга «Охрана подземных вод» [4]. Изданию предшествовали научные командировки за рубеж, а также обращение к опыту, накопленному в СССР по данной проблеме. Главное внимание уделено вопросам загрязнения и истощения подземных вод. Автор справедливо призывает к жесткой профилактике этих проявлений и обозначает основные мероприятии по охране не только подземных, но и, отчасти, поверхностных вод. Здесь же впервые приводится схема соподчинения резервуаров подземных вод, которая неоднократно обсуждалась с коллегами на семинарах и в частных беседах. Было не совсем понятно, для чего она приведена в тексте. Однако в более позднем издании «Основ гидрогеологии» в 6 томах высокая ценность этой схемы для понимания проблемы стала очевидной.

Многое зависит от типа коллектора — выбор расчетных схем эксплуатации, количество ресурсов; расчеты диффузионного загрязнения; объемы поступления и изъятия воды; трансформация поллютантов; способы и технологии магазинирования; расчеты природной защищенности; мониторинг и методы гидрогеологического картографирования. В работах [1, 4] для восполнения подземных вод настоятельно рекомендованы крупные инфильтрационные сооружения, которые впоследствии себя не оправдали. Опыт США и других стран по искусственному восполнению подземных вод показал высокую эффективность ветлэндов (мелких искусственно созданных болот, рассредоточенных по

площади), где инфильтрация происходит без ущерба для поверхностных водных ресурсов. Ветлэнды могут создаваться тысячами в год в зависимости от дефицита подземных ресурсов и наличия удобных площадей с учетом зон быстрой миграции по В.М. Шестопалову. В специальном томе [1] вопросы охраны подземных вод рассмотрены Е.В. Пиннекером более основательно, с расчетом на узких специалистов-гидрогеологов. Не буду останавливаться на содержании книги, поскольку она является произведением многих авторов.

И, наконец, в последней прижизненной монографии Евгения Викторовича, «Экологические проблемы гидрогеологии» [5], они рассматриваются как составная часть охраны окружающей среды и в то же время как составная часть гидрогеологии. С присущей ему основательностью в первой главе он излагает историю взаимодействия человека и природы с древнейших времен.

Вторая глава посвящена экологическим проблемам земных недр в контексте понятий геологическая среда и экологическая геология. Глава начинается с разбора терминов, к которым Учитель всегда относился с должной аккуратностью, хотя был момент на одном из семинаров, когда Евгений Викторович не выдержал и со ссылкой на В.И. Ленина заявил, что спорить о терминах — пустая трата времени. Так, на с. 13 впервые в книге появился термин «экологическая гидрогеология», задача которой — обеспечение человечества чистой водой. В пользу аргументации служит тезис, что это продиктовано социальной экологией.

Такой выраженный антропоцентризм значительно сужает рамки этой дисциплины, а с позиций системной экологии в принципе неприемлем. Понятно, что сейчас (по истечении почти 20 лет), когда вышло несколько учебников и учебных программ, легко рассуждать о тех недочетах, которые выявляются в монографии. Однако такие познавательные сравнения широко практикуются в истории исследований становления многих наук.

Итак, с современных позиций, следуя учебному пособию А.А. Шварца [6], к основным предметам изучения экологической гидрогеологии можно отнести следующие:

- влияние естественных и техногенных гидрогеологических условий на биосферу и, прежде всего, на человека;
- гидрогеологические аспекты изменения свойств геологической среды под воздействием человеческой деятельности;
  - прогноз и профилактику отрицательного воздействия на подземные воды;
  - принципы охраны и рационального использования подземной гидросферы.

Экологическая гидрогеология определяется автором как комплексная, междисциплинарная наука (отметим — не раздел геоэкологии и не дисциплина), охватывающая целый ряд разделов гидрогеологии, экологии, токсикологии, химии, радиоэкологии и других наук. Из этого определения и перечня задач следует, что экогидрогеология в большей степени прикладная научная дисциплина.

Аналогичного мнения придерживаются авторы первого фундаментального учебника гидрогеологов [7], но определение предмета изучения боле развернуто и конкретизировано. «Экологическая гидрогеология \_ наука 0 гидрогеологических, гидрогеодинамических и гидрогеохимических трансформациях подземной гидросферы (гидролитосферы), как компонента окружающей среды и базовой составляющей природногидрогеологических технических (техногенных) систем  $(\Pi T \Gamma \Gamma \Gamma \Gamma)$ под влиянием антропогенной нагрузки и природно-технических катастроф» [7, с. 9]. По своему содержанию авторы эту науку считают прикладной с социальной направленностью. Не будем комментировать эти определения, они появились позже монографии Е.В. Пиннекера. Значительные семантические расхождения в определениях наглядно показывают, насколько различны понятия предмета исследований. Главный вывод — экологическая гидрогеология находится в стадии становления, и считать ее самостоятельной наукой пока рано. Скорее, это раздел гидрогеологии и геоэкологии, ставший актуальным в последние 20 лет.

Евгений Викторович подверг критике определение Н.И. Плотникова с соавторами за то, что в нем акцентируется прикладной характер экологической гидрогеологии, и поддержал мнение С.Л. Шварцева [5, с. 17] о том, что она имеет «фундаментальный задел и

должна опираться на теоретические основы». В то же время он отметил неполноту знаний о роли воды в становлении литосферы и биосферы. Скептицизм продиктован публикациями Степана Львовича о главенствующей роли воды практически во всех эволюционных процессах, протекающих на Земле и в ее недрах на протяжении становления как планеты [8]. Последние данные космических исследований подтверждают позиции С.Л. Шварцева, с которыми трудно не согласиться. Эксперименты по оценке системообразующей роли разгрузок подземных вод на Крымском полигоне [9] указывают на превалирующую роль водных растворов в становлении взаимодействия компонентов экосистем и трансформации практически исследуемых полиаренов.

В этом же разделее монографии (раздел 2.2) делается попытка охарактеризовать техногенные гидрогеологические системы. Задача чрезвычайно сложная и трудная, поскольку провести четкую грань между техногенными и естественными системами (а для неравновесных тем более) практически невозможно. Все дело в объективности критериев выделения степени внешних воздействий (техногенности) на фоне естественной или техногенной эволюции (флуктуаций) систем. Здесь Евгений Викторович встает на позиции известного географа, академика Б.В. Сочавы, создавшего еще в 70-х годах в Иркутске научную школу и учение о геосистемах. Иерархический подход к познанию структуризации сложных систем от водоносной поры или трещины до гидрогеологических кратогена или орогена сближает научные платформы этих выдающихся ученых.

Перейдем снова к важнейшим определениям. Под *техногенной гидрогеологической системой* понимается участок (блок) подземной гидросферы, испытывающий техногенное воздействие. Такой участок (блок) характеризуется устойчивыми или постоянно меняющимися полями гидрогеохимических, гидрогеодинамических и гидрогеотермических параметров, существенно отличающихся от природных (фоновых) значений [5, с. 24]. Не совсем ясно, кому принадлежит данное определение: Ю.П. Гаттенбергу, который впервые ввел это понятие для нефтегазовых месторождений (на него есть ссылка в книге), либо Е.В. Пиннекеру (как правило, он подчеркивал, что термин предлагается им).

Отметим семантические неопределенности трактовки термина. Участок и блок подземной гидросферы суть разные понятия. Первый термин применяют чаще при ландшафтном районировании; блок пород предопределен границами, это чисто геологический термин. Подземная гидросфера – понятие внеранговое, где установление и идентификация границ в большей степени условны, неопределенны и проблематичны. Любое техногенное воздействие имеет пределы, при которых гидрогеологическая система не возвращается к исходной точке эволюции, т.е. по своей природе она не детерминирована и даже не стохастична. Скорее всего, это свойство систем «третьего типа», в которых реализуется эффект Н.А. Бернштейна «повторение без повторения» (1947). До настоящего времени не создано моделей, адекватно отражающих это важнейшее свойство систем. При синергетическом воздействии факторов вводить понятие устойчивости – научный нонсенс. Чаще природой создаются системы, далекие от равновесия и стационарности. Пригожинский принцип нелинейной динамики не всегда применим к таким системам, как и хакеновская синергетика. Для систем этого типа необходима оценка траектории их движения от хаоса к порядку, или «стрела времени» в терминологии И. Пригожина. Мы же работаем с временными срезами состояния систем, и достаточно трудно объективно оценить, на каком временном отрезке находится исследуемая система. Что принимать за порядок? Фоновые значения? Но гидрогеологические (а гидрогеохимические тем более) системы неравновесны, кинетически необратимы. Они могут быть метастабильны, по Б.Н. Рыженко, и, равновесно-неравновесны в представлениях С.Л. Шварцева. Энергия поступает извне (и вместе с тем генерируется самой системой) в виде квантов; следовательно, и фон будет изменяться во времени и пространстве. Природные и фоновые «значения» отнюдь не синонимы.

Эволюционные уравнения состояния систем применимы преимущественно для детерминированных закрытых систем. Мы же имеем дело с открытыми системами, в большей степени стохастичной природы, которые в исходное состояние при техногенном

воздействии вряд ли вернутся. Согласно современным представлениям, эволюция систем рассматривается как процесс самоорганизации, а направленность траектории их развития тяготеет в сторону роста разнообразия форм структурной сложности (энтропии). Такие переходы систем в новое качество сопровождаются появлением новых связей элементов и исчезновением старых, вплоть до изменения типов и их функционального назначения. При техногенном воздействии эти эффекты ускоряют или замедляют эволюцию природных систем. Маловероятно, что система вернется в прежнее состояние. Эффекты отклонений всегда будут, пусть отдаленные или вторичные, не фиксируемые инструментально.

В монографии [5] со ссылкой на статью Б.И. Писарского приводится четыре типа состояния эволюции гидрогеологических систем, в том числе и обратимые. То есть автор в принципе допускает «обратимый процесс эволюции» (это нонсенс!) при снятии техногенной нагрузки для одного из типов. Отчасти это соответствует принципу возврата стального зажатого стержня при его отклонении. Но каждая природная система в зависимости от иерархического уровня изучения уникальна.

Далее следует справедливый вывод о слабой изученности иерархии техногенных гидрогеологических систем. Этот вывод убедительно подтверждается материалами последующих глав. Особенное беспокойство у автора монографии вызывают депрессионные эффекты эксплуатации подземных вод, которые, безусловно, интенсифицируют процессы их загрязнения. Приводятся многочисленные примеры, подтверждающие эту закономерность.

Хотелось бы отметить акцентирование автором проблемы загрязнения подземных вод органическими поллютантами, в том числе стойкими органическими загрязнителями (СОЗ). Сейчас этой проблеме, несмотря на трудности и дороговизну аналитических определений, зарубежные гидрогеологи отводят приоритетную роль (пример с ДДТ в монографии). Отношение к вопросам распространения СОЗ в целом значительно изменилось с принятием в 2001 г. Стокгольмской конвенции (Россия присоединилась к ней почти через 20 лет): такие вещества необходимо выводить из хозяйственного оборота. Вначале это была «чертова дюжина» веществ с повышенной канцерогенной и мутагенной активностью, сейчас этот список содержит более 35 наименований. Действительно, такие соединения в силу их токсичности активно выводятся из производства и употребления. Экологическая опасность СОЗ для подземных вод связана с невозможностью их хотя бы медленного разложения в процессах фотолиза и биодеградации. СОЗ в подземных водозаборах могут проявиться через десятки или даже сотни лет после их применения из первичного источника, возможно, в более токсичных формах, чем изначально (горький пример с г. Усольем-Сибирским).

Не потеряли свей актуальности и сейчас такие проблемы, как вторжение океанических вод в водозаборы, последствия закачки токсичных промстоков (в том числе радиоактивных) в подземные водоносные горизонты, последствия подземных ядерных взрывов, биологическое загрязнение (в том числе медицинскими отходами), подтопление приморских территорий с ростом уровня океана, организация зон санитарной охраны на водозаборах и др.

Нельзя не отметить исследования Е.В. Пиннекером формирования подземных вод в пределах криолитозоны. По-видимому, он предвидел эффекты и последствия глобального потепления климата, но мало кто ожидал, что это будет так скоро! Завершается монография призывом к необходимости раскрытия масштабов и механизмов взаимодействия в основополагающей системе «вода—порода—газ—органическое вещество».

#### Список литературы

- 1. Основы гидрогеологии: Использование и охрана подземных вод/ Отв. ред. Н.А. Маринов, Е. В. Пиннекер. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1983. 231 с.
- 2. Пиннекер Е.В., Шенькман Б.М. Проблемы охраны подземных вод Восточной Сибири от загрязнения/ В кн.: Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии Восточной Сибири. Иркутск, 1974. С. 53–63.

- 3. Пиннекер Е.В. Проблемы региональной гидрогеологии (закономерности распространения и формирования подземных вод). М.: «Наука», 1977. 196с.
  - 4. Пиннекер Е.В. Охрана подземных вод. Новосибирск: «Наука», 1979. 70 с.
  - 5. Пиннекер Е.В. Экологические проблемы гидрогеологии. Новосибирск: Наука, 1999. 124 с.
- 6. Шварц А. А. Экологическая гидрогеология. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 1996. 60 с.
- 7. Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В. Экологическая гидрогеология. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 399 с.
- 8. Шварцев С.Л. С чего началась глобальная эволюция? // Вестник Российской академии наук, 2010, т. 80, № 3. С. 235–244.
- 9. Хаустов А.П., Редина М.М., Яковлева Е.В. Водопроявления подземных вод как геохимические системообразующие объекты (интерпретация на основе распределения ПАУ) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2018, №3. С.3–17.

#### І. ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА. ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

#### ИСТОЧНИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НЕОГЕНОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПАЛЕОДОЛИНАХ НА ХИАГДИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ УРАНА

DOI:10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-34-38

Василевский П.Ю. $^{1,3}$ , Волкова М.К. $^{1,3}$ , Солодов И.Н. $^2$ , Кортунов Е.В. $^3$ , Лехов А.В.  $^3$   $^1AO$  «ВНИПИпромтехнологии», Москва, Vasilevskiy.P. Y@vnipipt.ru  $^2AO$  «АРМЗ», Москва, INSolodov@armz.ru  $^3$ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, hydro@geol.msu.ru

Аннотация. Анализ ограниченного объема гидрогеологических данных, полученных в ходе проведения геологоразведочных работ, а также фондовых и опубликованных материалов позволил представить концепцию формирования подземных вод в рудоносном водоносном горизонте на Хиагдинском месторождении урана. Согласно предложенной концепции, формирование подземных вод продуктивных неогеновых отложений происходит посредством смешения вод двумя путями: 1) при инфильтрации метеорных вод сквозь талики в многолетнемерзлых породах и трещины в базальтах; 2) при разгрузке глубинных холодных углекислых вод из пород фундамента. Выявленные в ходе исследования гидродинамические и гидрохимические закономерности позволяют оптимизировать процесс скважинного подземного выщелачивания урана и сделать шаг в понимании сложных гидрогеологических условий месторождения.

**Ключевые слова:** гидрогенное месторождение урана, палеодолина, инфильтрация, холодные углекислые воды, гидрогеохимия.

**Abstract.** Analysis of limited hydrogeological data obtained during field exploration, as well as file and published materials allowed us to present the concept of groundwater formation in the productive aquifer at the Khiagda uranium field. According to the proposed concept, the formation of groundwater of productive neogene deposits occurs by mixing of water from two sources: infiltration of meteoric water through frost-free rock zones in permafrost and cross-cutting cracks in the basalts and discharge of deep cold carbon dioxide water from basement rocks. The hydrodynamic and hydrochemical patterns identified during the present study allows to optimize the uranium mining process and make a step in understanding the complex hydrogeological conditions of the field.

**Key words:** hydrogenic uranium field, paleovalley, infiltration, cold carbon dioxide water, hydrogeochemistry.

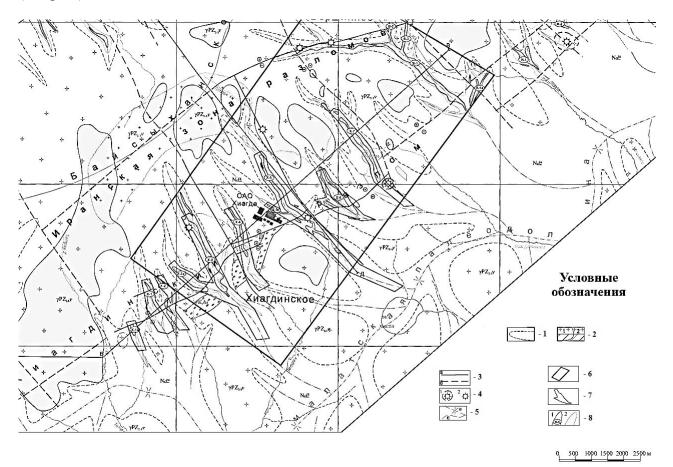
Гидрогенное урановое месторождение Хиагдинское палеодолинного типа — одно из восьми месторождений Хиагдинского рудного поля (ХРП), которое является частью Витимского ураново-рудного района на Витимском плоскогорье (Баунтовский эвенкийский район Республики Бурятия) (рисунок). В 11 урановых залежах месторождения площадью 1.68 км² сосредоточено 10574 т урана [1].

Отличительной чертой Хиагдинского месторождения, которая делает его непохожим на аналогичные объекты в России, Казахстане, Узбекистане, Австралии, Китае [2] и США, является суровый климат района, обусловливающий низкую температуру подземных вод  $(2-4\ ^{\circ}\text{C})$  и повсеместное распространение многолетнемерзлых пород (ММП) на глубину  $40-90\ \text{м}$ .

Месторождение отрабатывается методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Для возможности эффективной добычи урана методом СПВ принципиальным является наличие благоприятных гидрогеологических условий в рудоносном водоносном горизонте. Месторождение характеризуется крайне сложными и недостаточно изученными на стадии геологоразведочных работ (ГРР) [3, 4] гидрогеологическими условиями: неизвестны пути инфильтрации атмосферных вод через базальтовый покров и толщу ММП; не изучены масштабы разгрузки глубинных холодных углекислых подземных вод; непонятен характер влияния разрывных нарушений на структуру потока подземных вод и ряд других факторов, которые отрицательно воздействуют на процесс СПВ урана.

Целью настоящего доклада является попытка при ограниченном объеме гидрогеологических данных представить концепцию формирования подземных вод в рудоносном водоносном горизонте с учетом исследований, проведенных на других месторождениях XPП [5–9].

Согласно ЭТИМ исследованиям, В геологическом строении Хиагдинского месторождения выделяются два структурных этажа: преимущественно гранитный фундамент палеозойского (Рz2-3v) возраста и кайнозойский чехол осадочных, вулканогенноосадочных и вулканогенных отложений. Верхний структурный этаж в основании разреза пролювиально-делювиально-аллювиальными осадочными отложениями нижнеджилиндинской подсвиты  $(N^{2-3}_1 dz_1)$ . Выше по разрезу их сменяют вулканогенно-осадочные отложения (осадки представлены болотно-озерными песчаноглинистыми и алеврито-глинистыми литологическими разностями) верхнеджилиндинской подсвиты  $(N^{2-3}_1 dz_2)$ . Конседиментационно их покрывает базальтовый трап хойготской свиты  $(N_2hg-Q_4).$ 



Фрагмент геологической карты Хиагдинского рудного поля (воспроизведен по [4]). I – контуры неогеновых палеодолин; 2 – донеогеновые породы, выходящие на поверхность (1) и перекрытые базальтами (2); 3 – тектонические нарушения: a – установленные, b – предполагаемые. В кружке – знак перемещения; b – вулканические аппараты в масштабе карты (1) и вне масштаба (2); b – осевые линии палеодолин: b – первого порядка (стволовые), b – второго порядка и выше; b – контуры лицензии на Хиагдинском месторождении; b – рудные залежи с контуры горных отводов на Хиагдинском месторождении; b – рудные залежи с кондиционным (1) и некондиционным (2) урановым оруденением.

В гидрогеологическом разрезе выделяют четыре водоносных горизонта: на промороженных базальтах залегают сезонные воды четвертичных отложений и трещиноватых базальтов и гранитов, выходящих на поверхность; под подошвой ММП залегает водоносный горизонт в трещиноватых базальтах хойготской свиты и в отложениях

тонкозернистых озерных песков верхнеджилиндинской подсвиты (базальтовый водоносный горизонт); под глинами и алевролитами вулканогенно-осадочной толщи залегает рудоносный (продуктивный) водоносный горизонт нижнеджилиндинской подсвиты, нижним водоупором служат отложения зоны полных глинистых изменений коры выветривания гранитов; четвертый водоносный горизонт приурочен к зоне дезинтеграции коры выветривания витимканских гранитов. Также выделяют подземные воды в зонах тектонических разрывных нарушений северо-восточного (70 °CВ) простирания. По этим зонам предполагается очаговая разгрузка глубинных холодных углекислых подземных вод, не подтвержденная гидрогеологическими исследованиями. Холодные углекислые подземные воды сравнительно хорошо изучены в Забайкалье (например [10, 11]), но не были опробованы непосредственно на территории исследования.

Анализ фондовой и опубликованной литературы, а также собственные исследования позволяют предложить следующую концепцию — формирование подземных вод рудоносных неогеновых отложений происходит путем смешения вод из двух источников: 1) метеорных вод, инфильтрующихся сквозь талики в многолетнемерзлых породах и трещины в базальтах и 2) глубинных холодных углекислых вод, разгружающихся из пород фундамента по зонам разломов северо-западного (320–330 °C3) простирания, которые наследуют палеодолины.

Изучение карты статических уровней (до начала эксплуатации месторождения) подземных вод в 555 разведочных скважинах показывает, что в рудоносном водоносном горизонте, разобщенном локальными водоразделами в верховьях палеодолин, существует гидродинамическая связь в низовьях палеодолин, где подземные воды разгружаются в стволовую Амалатскую палеодолину 1-го порядка. Анализ карты показал, что в продуктивном горизонте преобладает замедленный водообмен при гидравлическом уклоне поверхности подземных вод  $n \cdot 0.010$ — $n \cdot 0.001$ . Этот результат противоречит мнению авторов статьи [12] о существовании застойного режима подземных вод в рудоносном горизонте.

Гидрогеохимические исследования в ходе опытно-фильтрационных работ на стадии ГРР и вскрытия рудных залежей технологическими скважинами позволили установить следующие закономерности: 1) сравнение средних значений минерализации подземных вод показывает, что содержание растворенных солей в рудоносном горизонте (1300–1900 мг/л) выше в 2.5-4.5 раза по сравнению с подземными водами базальтового горизонта (360-740 мг/л), что позволяет предположить затрудненную связь между водоносными горизонтами на большей части исследуемой территории; 2) в базальтовом горизонте присутствуют натриево-кальциевые и кальциево-натриевые гидрокарбонатные источником образования которых являются атмосферные воды, что свидетельствует о проницаемости базальтов и ММП; 3) в рудоносном водоносном горизонте преобладают более минерализованные гидрокарбонатно-магниевые воды, часто с высоким содержанием которые от низовьев к верховьям палеодолин сменяются минерализованными гидрокарбонатными натриево-кальциевыми и кальциево-натриевыми водами, близкими по составу к водам базальтового горизонта, что предполагает наличие инфильтрационного питания горизонта через сквозные талики и зияющие трещины в базальтах в верховьях палеодолин; 4) минимальные значения содержания таких компонентов как  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  и  $K^+$ ,  $Fe^{2+}$ , в пробах подземных вод продуктивного горизонта приближены по составу к надмерзлотным водам, но с увеличением доли карбонатных составляющих и магния вследствие геохимических преобразований или смешения с холодными углекислыми водами; 5) воды с максимальными концентрациями этих ионов приближены по составу к холодным углекислым водам в равновесии с карбонатными минералами; 6) для водородного показателя проб подземных вод рудоносного водоносного горизонта максимальное значение примерно соответствует равновесному рН в системе, открытой к карбонатным минералам и закрытой к СО2, а минимальное значение открытой соответствует системе,  $CO_2$ но закрытой карбонатам; К 7) построение корреляционных графиков основных показателей химического состава

подземных вод продуктивного горизонта ( $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  и  $K^+$ ,  $Fe^{2+}$ , pH, сухой наличие линейной корреляционной продемонстрировало связи между концентрациями ионов гидрокарбоната, магния и сухого остатка; 8) данные связи подтверждают влияние разгрузки холодных углекислых вод на состав подземных вод продуктивного горизонта; 9) дополнительным доказательством проникновения метеорных вод в верховьях палеодолин является смена от верховьев к низовьям окислительных условий (Eh +100 мВ) на сильно восстановительные (Eh до -400 мВ); 10) наличие глубинного углекислого газа и магния в подземных водах рудоносного горизонта позволяет предположить наличие очаговой разгрузки холодных углекислых подземных вод из вдоль палеооврагов, трещиноватых гранитов тальвегов совпадающих доседиментационными зонами разломов северо-западного (320–330 °C3) простирания, которые унаследуют палеодолины; 11) предположительно источником магния являются витимканские граниты, магнезиальность которых составляет 2.5 %, что намного выше содержания магния в рудоносных отложениях – 0.2–0.4 % (в форме MgO); 12) минерализация подземных вод в пределах месторождения возрастает в ЮЗ направлении от 600 до 5000 мг/л с ростом глубины залегания рудных тел от 100 до 280 м.

Магниевый катионный состав и повышенная минерализация (до 6.5 г/дм<sup>3</sup> на месторождении Кореткондинское) холодных углекислых подземных в пределах южной части Витимского плоскогорья является экзотикой. Эти воды не похожи на большинство термальных и холодных углекислых гидрокарбонатных натриево-кальциевых и кальциевонатриевых подземных вод Забайкалья [11], на что впервые обратил внимание В.М. Степанов [13], а позднее подтвердил Б.Н. Маринов [7]. Учитывая эти данные, а также наличие на территории ХРП 17 вулканических аппаратов и принимая во внимание тот факт, что последняя тектономагматическая активизация произошла 600 тыс. лет назад [14], авторы данного доклада предполагают весьма глубокий очаг зарождения этих вод (до 5 км [15]) при довольно медленном восходящем потоке через зоны трещиноватости древних (относительно рудоносных отложений) разломов СЗ направления. При этой скорости глубинные поствулканические воды успевают принять температуру окружающих горных пород.

Для расчета доли холодных углекислых вод в пробах, отобранных из продуктивного горизонта в ходе предварительной [3] и детальной [4] разведки, высказано предположение, что все пробы состоят из смеси вод двух источников: вод надмерзлотного водоносного горизонта и глубинных холодных углекислых вод. Доля глубинных вод в пробах была рассчитана по концентрациям ионов  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  и сухого остатка. В качестве опорных значений концентрации вод источников формирования использовались максимальные для минимальные ДЛЯ инфильтрационных вол. Результаты продемонстрировали увеличение доли глубинных вод в отдельных залежах с юго-запада на северо-восток. При этом внутри в каждой отдельной залежи доля глубинных вод достаточно стабильна, а в ее изменении сложно выделить какую-то систему. Отмечается независимость доли глубинных вод от близости к Хиагдинскому разлому и от принадлежности к поднятому или опущенному блоку. Таким образом, соотношение долей инфильтрационного и глубинного питания в формировании подземных вод продуктивного горизонта и локализация зон питания обоими способами достоверно не установлены. Для повышения точности определения доли источников питания и их локализации необходимо провести комплекс дополнительных полевых и камеральных работ, включающих в себя более подробную гидрогеохимическую съемку, изотопные исследования в водной и газовой фазах, серию численных экспериментов, включающих термодинамическое моделирование.

Выявленные гидродинамические и гидрогеохимические закономерности позволяют прогнозировать изменение производительности технологических скважин по площади рудных залежей и рекомендовать оптимальный режим кислотности выщелачивающих растворов при отработке рудных залежей СПВ.

Техногенное воздействие СПВ на ММП и подземные воды в рудоносном водоносном горизонте проявляется в следующих изменениях геологической среды. При непрерывной

закачке — откачке технологических растворов происходит локальное отепление мерзлоты на расстояние десятки сантиметров от оси технологических скважин. При их остановке температурное поле в ММП быстро восстанавливается до природных значений. Близкие к нейтральным по значению рН углекислые гидрокарбонатные магниевые природные подземные воды в процессе СПВ замещаются кислыми (рН 1.5–2.0) железо-алюмомагниевыми сульфатными солеными водами. После завершения СПВ урана техногенные воды постепенно под действием защитных геохимических свойств геологической среды нейтрализуются и деминерализуются вмещающими породами при участии естественной подземной микрофлоры и по химическому составу приближаются к природным подземным водам. Процесс автоочистки техногенных подземных вод занимает по времени десятки лет и неоднократно доказан натурными наблюдениями на отработанных методом СПВ урановых залежах [1].

### Список литературы

- 1. Геотехнология урана (российский опыт): монография / Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017. 576 с.
- 2. Hou B., Keeling J., Li Z. Paleovalley-related uranium deposits in Australia and China: A review of geological and exploration models and methods // Ore Geology Reviews. 2017. Vol. 88. P. 201-234.
- 3. Пешков П.А., Грязнов В.П., Ган В.Н. и др. Отчет о результатах предварительной разведки месторождений Хиагдинского рудного поля в Центральном Забайкалье с подсчетом запасов урана по состоянию на 1.05.1992 г. Отчет экспедиции № 130 по геологическому заданию 130-16 за 1986-1992 гг. ГГП «Сосновгеология». Иркутск, 1993.
- 4. Польский Г.М., Митрофанов Е.А., Деревенец В.Г. и др. Отчет о результатах разведочных работ на Хиагдинском урановом месторождении с подсчетом запасов по состоянию на 01.10.2013. М.: ЗАО «Русбурмаш». 2013.
- 5. Кочкин Б.Т., Солодов И.Н., Ганина Н.И. и др. Геохимические особенности рудовмещающей среды на месторождениях урана Хиагдинского рудного поля // Геол. рудн. мест. 2017 Т. 59, № 5. С. 349–362.
- 6. Макаров С.И., Ильичев А.В., Шуршалина М.А. Углекислые ураноносные источники южной части Витимского района (Западное Забайкалье) // Мат-лы по геол. мест. урана. Инф. сб. КНТС. М.: ВИМС, 1985. Вып. 95. С. 131–137.
- 7. Маринов Б.Н. К вопросу о происхождении гидрокарбонатных магниевых вод во впадинах Забайкальского типа // Геохимия. 1974. № 7. С. 1093–1099.
- 8. Солодов И.Н., Нестерова М.В. Углекислые подземные воды рудосохраняющий фактор на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля (Республика Бурятия) // Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований. Труды к 90-летию ИГЕМ РАН, электронное издание, 2020. С. 903–907.
- 9. Тарханова Г.А., Дубинчук В.Т., Чистякова Н.И. и др. Особенности минерального состава и условия формирования руд Вершинного месторождения // Разведка и охрана недр, 2014. № 6. С. 7–13.
  - 10. Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР. / Ред. А.И. Ефимов. М.: «Недра», 1970. 432 с.
- 11. Замана Л.В., Оргильянов А.И., Крюкова И.Г. Новые проявления углекислых вод в юго-восточном Забайкалье // Успехи современного естествознания. 2017. № 4. С. 78–83. URL: http://www.natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36438 (дата обращения: 13.02.2021).
- 12. Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Андреева О.В. и др. Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) // Геол. рудн. мест. 2017. Т. 59, № 2. С. 124–140.
- 13. Степанов В.М. Минеральные воды Северо-Западного Забайкалья // Минеральные воды Восточной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 149 с.
- 14. Рассказов С.В., Лямина Н.А., Черняева Г.П. и др. Стратиграфия кайнозоя Витимского плоскогорья: Феномен длительного рифтогенеза на юге Восточной Сибири. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2007. 193 с.
- 15. Ильичев А.В., Данковцев Р.Ф., Лукьянова В.Т., Маринов Б.Н. К вопросу о генезисе уранового оруденения в неогеновых палеорусловых структурах под покровом базальтов Витимского плато (Забайкалье) // Мат-лы по геол. мест. урана. Инф. сб. КНТС. М.: ВИМС, 1990. Вып. 125. С. 46–57.

# ОЦЕНКА РАЗГРУЗКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЧЕТВЕРТИЧНОГО ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА И ВЫНОСА ЖЕЛЕЗА И МЕТАНА В АЗОВСКОЕ МОРЕ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-39-42

Гарькуша Д.Н.<sup>1</sup>, Зубков Е.А.<sup>2</sup>, Федоров Ю.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт наук о Земле Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, gardim1@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН, Ростов-на-Дону

Аннотация. Проведена оценка массопереноса железа общего растворенного и метана в Азовское море четвертичным водоносным комплексом, доминирующим по объему стока. Среднегодовой объем подземного стока составляет 0.024 км³/год, при этом в его составе ежегодно выносится ~0.968 тонн железа и ~0.037 тонн метана. Доминирующий вклад (свыше 98 %) в объем подводного стока исследованных веществ вносит их поступление с северных участков водосборного бассейна Азовского моря, что обусловлено распределением модуля стока подземных вод. Сравнение полученных объемов выноса железа и метана в составе подземного стока непосредственно в Азовское море, минуя речную сеть, с объемом выноса этих веществ водами р. Дон свидетельствует о подчиненной роли подземных вод в формировании концентраций железа и метана в воде Азовского моря.

**Ключевые слова:** Азовское море, подземный массоперенос, четвертичный водоносный комплекс, железо, метан.

**Abstract.** The underwater mass transfer of total dissolved iron and methane to the Sea of Azov by the Quaternary aquifer complex, which dominates the volume of runoff, is estimated. The average annual volume of underground runoff is 0.024 km³/year, with ~0.968 tons of iron and ~0.037 tons of methane being removed annually. The dominant contribution (over 98 %) to the volume of underwater runoff of the studied substances is made by their input from the northern sections of the catchment basin of the Sea of Azov, which is due to the distribution of the groundwater flow module. Comparison of the transport of iron and methane composition of groundwater flow directly to the sea of Azov, bypassing the river network, with total removal of these substances by the waters of the don river, indicates the subordinate role of groundwater in the formation of concentrations of iron and methane in the water of the sea of Azov.

Key words: Sea of Azov, underground mass transfer, Quaternary aquifer complex, iron, methane.

#### Введение

Влияние подземного стока нередко является значительным фактором загрязнения придонных слоев воды и донных отложений основными загрязняющими веществами, концентрации которых контролируются в обязательном порядке в рамках национального мониторинга поверхностных вод суши, — нефтепродуктами, биогенными соединениями, тяжелыми металлами, в том числе железом [1–3], а также образования в них крупных метановых аномалий [4]. Последние могут оказывать значительное влияние на структуру и функциональные особенности экосистем принимающих водоемов и водотоков [5]. Негативное воздействие подземных вод для водосборного бассейна Азовского моря усугубляется последствиями развития процессов подтопления, спровоцированных во второй половине XX в. активизацией мелиоративной деятельности и способствующих увеличению доли грунтовых вод в питании рек и росту выноса легкорастворимых солей и загрязняющих веществ в их составе [3, 6, 7].

Как правило, ведущее участие в подземном питании рек и водоемов европейской территории России принимают воды первого от поверхности (грунтового) или нескольких верхних водоносных горизонтов, расположенных выше местных базисов эрозии [8]. Анализ имеющихся материалов по гидродинамике подземных вод и их ресурсам в бассейне Азовского моря [9–12 и др.] показывает, что сток в Азовское море имеют нижнемеловые, верхнемеловые, палеогеновые, неогеновые и четвертичные водоносные комплексы, развитые в пределах Азово-Кубанской и Причерноморской впадин, а также Степного и Горного Крыма. При этом основной вклад в общий подземный сток вносят воды четвертичного водоносного комплекса.

В настоящей работе авторами проведена оценка массопереноса железа общего растворенного (Fеобщраств.) и метана (CH4) в Азовское море подземными водами

четвертичного водоносного комплекса как наиболее изученного и доминирующего элемента в подземном питании моря.

Район исследования расположен на юге Восточно-Европейской равнины и занимает площадь около 140 тыс. км², что составляет 30 % от общей площади водосборного бассейна Азовского моря. Многочисленные рельефообразующие экзогенные и эндогенные факторы предопределяют возникновение на исследуемой территории разнообразных форм и типов рельефа, различия которых по абсолютным и относительным высотам, по глубине и интенсивности расчленения и густоты речной сети существенно влияют на условия формирования подземных вод и режим их стока в Азовское море [11, 12].

Восточное побережье моря к югу от Бейсугского лимана представляет собой обширные плавни с большим числом лиманов, соединяющихся между собой сложной сетью протоков дельты р. Кубань. Северная прибрежная часть разделена далеко вдающимися в море песчаными косами на обособленные друг от друга районы. В северо-восточной части море образует далеко вдающийся в сушу мелководный распресненный Таганрогский залив, а на западе сильно осолоненный залив Сиваш, отделенный от моря песчано-ракушечной пересыпью – Арабатской стрелкой [13].

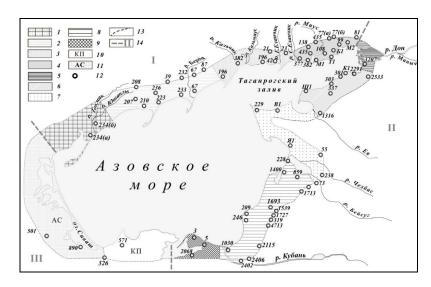
Используемый в настоящей статье гидродинамический метод расчета латерального потока подземных вод основан на применении закона фильтрации Дарси, где главным параметром является удельный расход фильтрационного потока с поперечным сечением при определенном градиенте напора [14]. Данная методика показала свою адекватность на примере нижнего течения реки Дон [6]. Методика даже при небольшом объеме фактического материала достаточно обоснованно и с большой степенью детальности позволяет единичные значения параметров, характеризующих состояние гидродинамической системы в отдельных точках, интерполировать на значительную территорию, определять расходы потоков и скорости фильтрации.

Водопроводимость водоносных горизонтов, гидродинамические и гидрохимические параметры стока подземных вод в Азовское море приняты по материалам государственных инженерно-геологических гидрогеологических съемок, гидрогеологических И гидрохимических исследований и опытно-фильтрационных работ авторов [2, 3, 5-7, 15], а также по архивным материалам и опубликованным данным научных исследований прошлых лет [9-12 и др.]. Следует отметить, что информации по территории Крымского полуострова недостаточно для проведения расчетной оценки стока подземных вод, поэтому при расчетах сток с данной территории не учитывался. В результате обобщения имеющегося гидрогеологического материала условная область разгрузки в пределах рассматриваемой территории была дифференцирована на 11 расчетных участков стока, выделяющихся сходными условиями распределения подземных вод и региональной направленности их стока (рисунок).

Отбор подземных вод, подготовка проб и определение растворенного железа общего и метана выполнены по общепринятым в системе Росгидромета стандартным методикам, используемым в ФГБУ «Гидрохимический институт» [16, 17]. Величины разгрузки подземных вод в замыкающем створе бассейна и соответствующие им модульные значения подземного стока используются в качестве параметров модели, характеризующих суммарное питание подземных вод в пределах бассейна, а также в качестве основной контрольной информации, дающей представление о распределении расходов подземного стока (разгрузке подземных вод по площади частных водосборов бассейна) [18].

Оценка стока подземных вод четвертичного водоносного комплекса в Азовское море показывает, что его суммарный суточный объем составляет 66296 м³/сут или 0.024 км³/год. Эта величина не превышает 0.1 % от среднегодового расхода воды в устьевом створе реки Дон [19]. При этом с относительно гипсометрически высокой северной части (Причерноморская впадина) бассейна Азовского моря суммарно разгружается около 65232 м³/сут (98.4 % от общего суточного стока подземных вод в море), а на гипсометрически низкие, с незначительными уклонами поверхности юго-восточную и восточную части

бассейна (дельта Дона, Азово-Кубанская низменность) приходится всего 1063 м³/сут. Максимальной величиной удельного расхода подземных вод характеризуются три расчетных участка, расположенных в пределах Причерноморской впадины: «Миусский лиман – Морской Чулек» (24239 м³/сут), «Белосарайская коса – Седово» (19937 м³/сут) и «Приморск – Бердянск» (18400 м³/сут).



Карта-схема распределения зон фильтрации: участки: I — «Молочный лиман»; 2 — «Приморск — Бердянск»; 3 — «Белосарайская коса — Седово»; 4 — «Миусский лиман — Морской Чулек»; 5 — «Дельта Дона»; 6 — «Береговое — Шабельское»; 7 — «Ейский полуостров»; 8 — «Приморско-Ахтарск — Темрюк»; 9 — «Таманский полуостров»; 10 — «Керченский полуостров»; 11 — «Арабатская стрелка»; 12 — точки отбора проб подземных вод; 13 — условные границы участков; 14 — условные границы геоструктурных элементов: 1 — Азово-Кубанская впадина, 11 — Причерноморская впадина, 11 — Степной и Горный Крым.

Согласно нашим исследованиям, концентрации  $Fe_{o6\text{III.раств.}}$  в подземных водах территорий, прилегающих к акватории Азовского моря, варьируются от 0.02 до 0.07 мг/дм³ (в среднем 0.04 мг/дм³). В водной толще нижнего течения р. Дон, Таганрогского залива и открытой акватории Азовского моря его концентрации в целом несколько выше и изменяются в пределах 0.02–0.69, 0.03–0.58 и 0.02–0.21 мг/дм³ соответственно [2]. Проведенные нами расчеты показывают, что ежегодно с подземным стоком четвертичного водоносного комплекса в Азовское море поступает около 0.968 тонн  $Fe_{o6\text{III.раств.}}$  или всего 1.61% от его количества, выносимого водами реки Дон (60 т/год по [20]).

Концентрация СН<sub>4</sub> в подземных водах территорий, прилегающих к акватории Азовского моря, а также в разгружающихся по его берегам родниках, варьируется от 0.1 до 4.0 мкл/дм<sup>3</sup> (в среднем 1.4 мкл/дм<sup>3</sup>) и по значениям несколько меньше или близка к концентрациям СН<sub>4</sub> в водной толще открытой акватории моря (в среднем 2.3 мкл/дм<sup>3</sup>) и Таганрогского залива (в среднем 6.8 мкл/дм<sup>3</sup> (по [21])) и заметно ниже его концентраций в воде нижнего течения р. Дон (в среднем 44.9 мкл/дм<sup>3</sup> (по [5])). Суммарный объем СН<sub>4</sub>, ежегодно поступающего с подземными водами четвертичного водоносного комплекса, составляет около 0.037 т/год (53 м<sup>3</sup>/год), что не превышает 0.005 % от его количества, выносимого рекой Дон (по [22]). При этом с северных расчетных участков бассейна Азовского моря, расположенных в пределах Причерноморской впадины, с подземными водами разгружается более 98 % суммарного количества Fе<sub>общ.раств.</sub> и СН<sub>4</sub>, что обусловлено величиной модуля подземного стока с данных участков.

Таким образом, выполненная оценка и сравнение полученных объемов подводного выноса  $Fe_{\text{общ. раств.}}$  и  $CH_4$  в Азовское море в составе доминирующего по объему четвертичного водоносного комплекса с объемом выноса этих веществ водами реки Дон

свидетельствует о подчиненной роли подземных вод в формировании концентраций Fe<sub>общ.</sub> раств. и CH<sub>4</sub> в воде Азовского моря.

Работа подготовлена при поддержке РФФИ, проект №19-05-00770 а.

### Список литературы

- 1. Зекцер И.С., Джамалов Р.Г. Подземные воды в водном балансе крупных регионов. Москва: Наука, 1989. 124 с.
- 2. Федоров Ю.А., Доценко И.В., Дмитрик Л.Ю. Железо в поверхностных и подземных водах бассейна Азовского моря // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2016. № 3. С. 91–99.
- 3. Никаноров А.М., Гарькуша Д.Н., Зубков Е.А., Барцев О.Б., Минина Л.И. Гидрохимический режим и качество грунтовых вод застроенных территорий юга Ростовской области // Водные ресурсы. 2018. Т. 45, № 2. С. 171–178.
- 4. Bugna G.C., Chanton J.P., Cable J.E., Burnett W.C., Cable P.H. The importance of groundwater discharge to the methane budgets of nearshore and continental shelf waters of the northeastern Gulf of Mexico // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1996. Vol. 60 (23). P. 4735–4746.
- 5. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. Ростов-на-Дону; М.: ЗАО «Ростиздат», 2007. 330 с.
- 6. Барцев О.Б., Никаноров А.М., Гарькуша Д.Н., Зубков Е.А. Оценка воздействия подземных вод на урбанизированных территориях на качество воды р. Дон в нижнем течении // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 82–92.
- 7. Никаноров А.М., Барцев О.Б., Гарькуша Д.Н., Зубков Е.А., Минина Л.И. Динамика, масштабы и причины подтопления населенных пунктов юга Ростовской области // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2016. № 2. С. 167–178.
- 8. Лобанская Н.П. Грунтовый сток на территории европейской части СССР // Информационные материалы Акад. строительства и архитектуры СССР, Всесоюз. науч.-исслед. ин-та водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии. М.: ВОДГЕО, 1959. 52 с.
- 9. Воронина Л.П., Родзянко Н.Г., Кизицкий М.Н. Ресурсы подземных вод бассейна Азовского моря и особенности их использования в народном хозяйстве // Известия Северо-Кавказского научного центра высшей школы. Серия естественные науки. 1973. № 1. С. 43–52.
- 10. Клименко В.И. Оценка ресурсов подземных вод в сложных гидрогеологических условиях на примере Азово-Кубанского артезианского бассейна. М.: Наука, 1974. 92 с.
- 11. Гидрогеология СССР. Т. 28. Нижний Дон и Северо-Восточное Приазовье. М.: Недра, 1970. 224 с.
  - 12. Гидрогеология СССР. Т. 8. Крым. М.: Недра, 1970. 364 с.
- 13. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1991. 237 с.
  - 14. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. Учебник. 3-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
- 15. Зубков Е.А., Гарькуша Д.Н., Барцев О.Б., Никаноров А.М. Грунтовые воды юга Ростовской области и их влияние на подтопление территорий населенных пунктов. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2019. 197 с.
- 16. РД 52.24.358-2006. Массовая концентрация железа общего в водах. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с 1,10-фенантролином. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГУ "Гидрохимический институт", 2006. С. 25.
- 17. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ГУ "Гидрохимический институт", 2012. 23 с.
- 18. Всеволожский В.А., Гриневский С.О. Оценка естественных ресурсов подземных вод с использованием балансово-гидродинамических моделей // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 4. С. 410–416.
- 19. Матишов Г.Г., Гаргопа Ю.М., Бердников С.В., Дженюк С.Л. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. Южн. науч. центр РАН. М.: Наука, 2006. 304 с.
- 20. Кленкин А.А., Корпакова И.Г., Павленко Л.Ф., Темердашев З.А. Экосистема Азовского моря: антропогенное загрязнение. Краснодар: ООО «Просвещение Юг», 2007. 324 с.
- 21. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология. 2016. № 6. С. 48–58.
- 22. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Основные источники и баланс метана в водной толще Азовского моря // Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». Т. IV. М.: ИО РАН, 2019. С. 112–116.

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ФОРМИРОВАНИЕ ИНФИЛЬТРАЦИОННОГО ПИТАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-43-47

Гриневский С.О., Поздняков С.П., Дедюлина Е.А. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, sogrin@geol.msu.ru

Аннотация. Проведено сопоставление среднемноголетних годовых и сезонных метеорологических характеристик по 22 метеостанциям, широтно расположенным с юга на север европейской части России, за периоды относительно стабильного (1965–1988 гг.) и меняющегося (1989–2018 гг.) климата, и проанализированы основные широтные закономерности их годовых и сезонных изменений. На основе фактических и 25-летних прогнозных многолетних метеорологических рядов проведено моделирование водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации и инфильтрационного питания подземных вод. Анализ результатов моделирования позволил оценить основные тенденции современных и ожидаемых климатических преобразований среднемноголетнего водного баланса и инфильтрационного питания подземных вод, а также их широтные закономерности.

**Ключевые слова:** инфильтрация, моделирование, водный баланс, изменение климата.

**Abstract.** A comparison was made of the average annual and seasonal meteorological characteristics of 22 meteorological stations located at latitude from south to north of the European part of Russia for periods of relatively stable (1965-1988) and variable (1989-2018) climates to analyze the main latitudinal regularities of their annual and seasonal climatic changes. On the basis of actual and 25-year forecast long-term meteorological series, the water balance on the surface of the earth and in the unsaturated zone as well as groundwater recharge were simulated. The analysis of the simulation results made it possible to assess the main trends of the current and expected climatic transformations of the average long-term water balance and groundwater recharge, as well as their latitudinal patterns.

Key words: groundwater recharge, groundwater simulation, water budget, climate change.

Основной целью проведенных исследований являлся анализ влияния наблюдаемых и ожидаемых климатических изменений на формирование водного баланса и инфильтрационного питания подземных вод на территории европейской части России (ЕЧР). Исследования проведены на основе многолетних рядов суточных метеорологических данных, включающих осадки, высоту снега, температуру воздуха и почвы, влажность воздуха и скорость ветра за период 1965–2018 гг., по 22 метеостанциям, широтно расположенным с юга на север ЕЧР (рис. 1).

Анализ метеорологических данных показывает статистически значимые тренды увеличения среднегодовой температуры воздуха и уменьшения скорости ветра, отвечающие *t*-критерию 95%-ной вероятности, наблюдаемые практически по всем метеостанциям с середины 1980-х годов; при этом многолетние тренды изменения годовой суммы осадков и влажности воздуха менее очевидны. Детальный анализ наблюдаемых климатических изменений и их широтных закономерностей проведен на основе сопоставления годовых и сезонных метеорологических характеристик за периоды относительно стабильного (1965—1988 гг.) и меняющегося (1989—2018 гг.) климата на уровне простых среднемноголетних значений и показал следующее (рис. 1).

На всей территории ЕЧР произошло преимущественное увеличение среднемноголетней годовой суммы осадков до 50 мм/год. При этом, однако, наблюдаются значимые широтные различия их сезонных среднемноголетних изменений (±20 мм/год): для северных территорий характерно увеличение зимних и летних осадков и уменьшение осенних, а для южных, наоборот, среднемноголетние зимние и летние осадки уменьшились, а осенние увеличились.

Среднемноголетняя годовая температура воздуха увеличилась в среднем одинаково на всей территории — на 1.2-1.4 °C, за исключением самых южных станций, где увеличение составило 0.5-1.0 °C (рис. 1). При этом по всем станциям отмечается максимальное увеличение зимней температуры воздуха, которое практически линейно изменяется в широтном направлении: от 1 °C — на юге, до 3 °C — на севере территории.

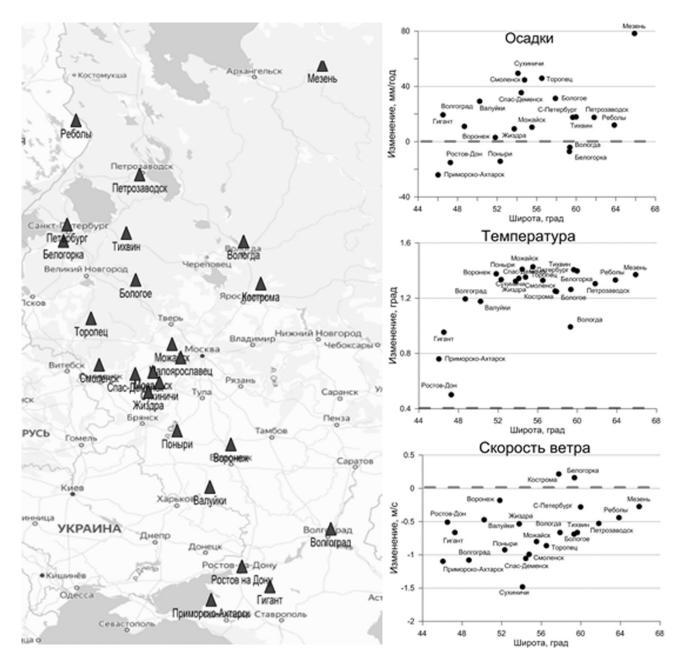


Рис. 1. Схема расположения метеорологических станций и широтные изменения среднемноголетних осадков, температуры воздуха и скорости ветра на территории ЕЧР за современный (1989–2018 гг.) период по сравнению с предшествующим (1965–1988 гг.).

На всей территории ЕЧР наблюдается относительно равномерное уменьшение среднемноголетней скорости ветра как в годовых, так и в сезонных значениях, в среднем на 0.5-1.0 м/c (рис. 1), что в целом согласуется с официальными данными [1].

Исследования влияния наблюдаемых климатических изменений на инфильтрационное питание подземных вод проведены на основе моделирования процессов его формирования. Модель инфильтрационного питания состоит из двух блоков. В первом блоке, программе SurfBal, разработанной на кафедре гидрогеологии МГУ, моделируются процессы трансформации осадков на поверхности земли, включая их перехват растительностью и испарение с нее, образование поверхностного стока и впитывание влаги в почву с учетом накопления и таяния снега, а также промерзание — оттаивание почвы [2–4]. Полученные в результате моделирования суточные величины впитывания влаги и потенциальной эвапотранспирации, характеризующей теплоэнергетический потенциал поверхности, определяют условие на верхней границе второго модельного блока, в котором моделируется

одномерный нестационарный влагоперенос в зоне аэрации с учетом испарения и отбора влаги корнями растений на основе программы HYDRUS-1D [5]. При этом расчетные значения потока влаги на нижней границе модели влагопереноса, которой является уровень грунтовых вод, характеризуют инфильтрационное питание. Моделирование проведено на основе суточных рядов метеорологических характеристик за период 1965–2018 гг. для четырех типов ландшафта поверхности, представленных сочетанием древесной или травянистой растительности на песчаной или суглинистой почве, при их характерных параметрах [6, 7]

По результатам двух этапов моделирования рассчитывается суточный, годовой и среднемноголетний водный баланс на поверхности земли и в зоне аэрации, который сопоставляется для периодов относительно стабильного (1965–1988 гг.) и современного меняющегося (1989–2018 гг.) климата. Это позволяет оценить, как наблюдаемые климатические изменения осадков  $\Delta$ О и других метеорологических характеристик (рис. 1) трансформировались в изменения среднемноголетнего водного баланса:

$$\Delta O = \Delta ETR + \Delta S + \Delta W \pm \Delta V$$

где ETR — суммарная эвапотранспирация, S — поверхностный сток, W — инфильтрационное питание, V — влагозапасы зоны аэрации, а  $\Delta$  — их среднемноголетнее изменение.

Результаты моделирования показали следующие основные изменения среднемноголетнего водного баланса [8].

- 1. В современный период (1989–2018 гг.) на юге территории ЕЧР произошло уменьшение поверхностного стока, а на севере его увеличение в диапазоне ±20 мм/год. При этом во всем регионе отмечается существенная трансформация внутригодового гидрографа поверхностного стока уменьшение пика половодья и увеличение зимнего стока в периоды оттепелей. Основной причиной таких трансформаций является наблюдаемое увеличение зимней температуры воздуха и связанные с ним сокращения высоты снежного покрова глубины промерзания почвы, что подтверждается результатами корреляционного анализа расчетных изменений зимне-весеннего стока и фактических изменений этих характеристик.
- 2. Несмотря на значительный рост среднемноголетней температуры воздуха на всей территории ЕЧР (рис. 1), результаты моделирования показали неоднозначные изменения суммарной эвапотранспирации ее преимущественное увеличение на юге и севере до +30 мм/год и уменьшение в центральной части региона до -20 мм/год. Результаты корреляционного анализа показали, что такие незакономерные вариации суммарной эвапотранспирации связаны с разнонаправленным влиянием климатических изменений на физическое испарение и транспирацию. С одной стороны, по результатам моделирования получено преимущественное увеличение транспирации, которое наилучшим образом коррелирует с ростом осадков. С другой стороны, расчетное среднемноголетнее испарение преимущественно сократилось (особенно в центре ЕЧР), и его сокращение коррелируется с уменьшением скорости ветра, которое в этом случае оказывается более значимым фактором влияния, чем рост температуры воздуха.
- 3. Разнонаправленные климатические преобразования водного баланса на поверхности земли и в зоне аэрации привели к различным широтным изменениям среднемноголетнего инфильтрационного питания (рис. 2, a). На юге региона, в условиях недостаточного увлажнения, среднемноголетнее инфильтрационное питание практически не изменилось, в то время как в центре и на севере ЕЧР, территориях с избыточным увлажнением, оно увеличилось до 50–60 мм/год (рис. 2, a,  $\delta$ ). При этом направленность и масштаб климатических изменений среднемноголетней инфильтрации во многом определяются изменением в современный период коэффициента увлажнения территории  $O/ET_0$ , где  $ET_0$  потенциальная эвапотранспирация, рассчитанная по методу Пенмана-Монтейта [9] (рис. 2, a).

Также увеличение среднемноголетнего инфильтрационного питания связано с ростом зимнего поступления влаги в периоды оттепелей, вызванных увеличением зимних осадков и

температуры воздуха. Это подтверждается корреляцией изменения среднемноголетней инфильтрации и сокращения глубины сезонного промерзания (рис. 2, г), а также существенным сезонным перераспределением запасов почвенной влаги: их увеличением зимой и уменьшением весной. При этом максимальное увеличение питания происходит на песчаных почвах, где поступление влаги в периоды оттепелей быстрее достигает уровня грунтовых вод.

Таким образом, результаты моделирования показывают, что наиболее значимые климатические преобразования водного баланса, влияющие на формирование инфильтрации, происходят в зимне-весенний период.

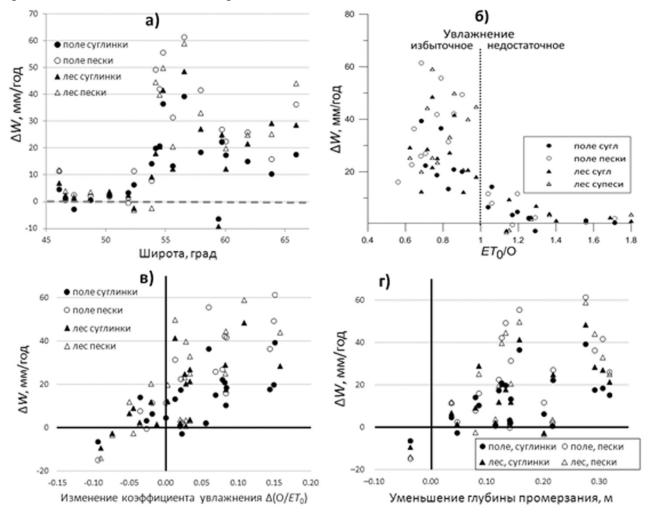


Рис. 2. Изменение среднемноголетнего инфильтрационного питания  $\Delta W$  в зависимости от: a) — широты;  $\delta$ ) — индекса аридности  $ET_0/O$ ;  $\epsilon$ ) — изменения коэффициента увлажнения  $\Delta(O/ET_0)$ ;  $\epsilon$ ) — уменьшения глубины промерзания.

Прогнозная оценка влияния ожидаемых климатических изменений на условия формирования инфильтрационного питания подземных вод проведена на основе фактических рядов метеоданных за период 1989–2018 гг. и их экстраполяции на ближайшие 25 лет в двух постановках. В первом сценарии генерация прогнозных метеорологических рядов проведена при условии сохранения таких же среднемноголетних изменений месячных метеохарактеристик  $\Delta X$  на расчетный 25-летний период  $\Delta t$  при их равномерном прогнозном изменении на величину  $\Delta X/\Delta t$ . Во втором случае принят сценарий сохранения наблюдаемых трендов изменения месячных значений, согласно которому прогнозное изменение характеристики рассчитывается, исходя из линейного тренда за период 1989–2018 гг. Результаты прогнозного моделирования климатических изменений показали, что при сохранении климатических изменений период

среднемноголетних значений (сценарий 1) сохраняются те же тенденции перестройки водного баланса, что приводит к дальнейшему увеличению инфильтрационного питания в центре и на севере ЕЧР. Однако при сохранении существующих 25-летних трендов климатических изменений (сценарий 2) прогнозируется уменьшение среднемноголетнего инфильтрационного питания до 20 мм/год на всей территории ЕЧР. Это связано с «опережающим» трендом увеличения температуры воздуха по сравнению с трендами изменений других метеохарактеристик.

#### Выводы

Несмотря на повсеместное увеличение температуры воздуха в современный период, среднемноголетнее инфильтрационное питание на юге ЕЧР не изменилось, а на севере и в центре даже возросло до 50–60 мм/год (на 30–40 % для некоторых ландшафтов).

Такое увеличение среднемноголетнего инфильтрационного питания вызвано:

- относительно небольшим изменением суммарной эвапотранспирации, поскольку наблюдаемое увеличение температуры воздуха существенно «компенсируется» снижением скорости ветра;
- увеличением «зимнего» питания в период отсутствия эвапотранспирации, вызванного существенным ростом зимних температур и осадков и уменьшением глубины сезонного промерзания.

Результаты прогнозного моделирования показали неоднозначность влияния ожидаемых в ближайшие 25 лет климатических изменений на условия формирования инфильтрационного питания и высокую чувствительность результатов прогноза к возможным климатическим сценариям. Это обусловлено разнонаправленным и разномасштабным воздействием возможных изменений метеорологических характеристик на процессы формирования водного баланса и инфильтрационного питания подземных вод.

## Список литературы

- 1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.:Росгидромет, 2014. 58 с.
- 2. Гриневский С. О., Поздняков С.П. Принципы региональной оценки инфильтрационного питания подземных вод на основе геогидрологических моделей // Водные ресурсы. 2010. Т. 37, № 5. С. 543–557.
- 3. Поздняков С.П., Гриневский С.О., Дедюлина Е.А. Влияние климатических изменений на многолетнюю динамику сезонного промерзания в Московском регионе: ретроспективный анализ и неопределенности прогноза на вторую половину XXI века // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII, № 4. С. 26–35.
- 4. Pozdniakov S.P., Vasilevskiy P.Y., Grinevskiy S.O. Estimation of groundwater recharge by flow in vadose zone simulation at the watershed with different landscapes and soil profiles // Engineering geology and hydrogeology. Bulgarian academy of Sciences. ISSN 0204-7934. 2015. № 29. P. 47–58.
- 5. Šimůnek J., Šejna M., Saito H. et al. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. Ver. 4.08. Prepr. Depart. of Environ. Sci. University of California Riverside. California, Riverside, 2009. 296 p.
- 6. Гриневский С.О. Схематизация строения и параметров зоны аэрации для моделирования инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 6. С. 56–67.
- 7. Гриневский С.О. Моделирование поглощения влаги корнями растений при расчетах влагопереноса в зоне аэрации и инфильтрационного питания подземных вод // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2011. № 3. С 41–52.
- 8. Grinevskiy S.O., Pozdniakov S.P., Dedulina E.A. Regional-scale model analysis of climate changes impact on the water budget of the critical zone and groundwater recharge in the European part of Russia. // Water 2021. 13, 428. https://doi.org/10.3390/w13040428.
- 9. Allen R.G., Pereira S., Raes D., Smith M. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements // FAO Irrigation and Drainage. Pap. 56. Food and agriculture organization of the united nations, 1998. http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm (accessed on 15.02.2021).

# ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ: ОБЪЕКТЫ, ЗАДАЧИ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ПРОБЛЕМЫ НА ТЕРРИТОРИИ УРАЛЬСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-48-52

Елохина С.Н.<sup>1</sup>, Прачкина Т.В.<sup>2</sup>, Сергеева А.С.<sup>1</sup>
<sup>1</sup>«ГИДРОСПЕЦГЕОЛОГИЯ», Филиал «Уральский региональный центр ГМСН»,

Екатеринбург, sergeeva@gmsn-ural.ru
<sup>2</sup>«ГИДРОСПЕЦГЕОЛОГИЯ», Москва, pr.tatjana@gmail.com

Аннотация. Гидрогеологический мониторинг — это регулярные наблюдения, сбор, систематизация, обобщение и анализ данных для оценки состояния подземных вод и его прогнозирования. В Российской Федерации основой служат работы гидрорежимных партий периода СССР. Применительно к масштабам наблюдения, источникам финансирования и решаемым задачам мониторинг подразделяется на три уровня: объектный, территориальный, федеральный. Объектный мониторинг является самым массовым, а федеральный — наиболее стабильным и регулярным. Последний включен в систему государственного мониторинга состояния недр. Изложены основные информационные источники последнего, краткая методика реализации и оценка состояния подземных вод на территории Урала. Проблемы ведения государственного мониторинга связаны с внедрением унифицированной гидрогеологической стратификации, обновлением пунктов наблюдений и непостоянством лабораторной базы.

**Ключевые слова**: мониторинг подземных вод, загрязнение подземных вод, Уральский федеральный округ.

Abstract. Hydrogeological monitoring is the regular observations, collection, systematization, generalization and analysis of data for the assessment of the state of groundwater and its forecasting. In the Russian Federation, the basis is the work of hydro-regime parties of the USSR period. In relation to the scope of monitoring, sources of funding and tasks to be solved, monitoring is divided into three levels: object, territorial, and federal. Object monitoring is the most widespread, and federal monitoring is the most stable and regular. The latter is included in the system of state monitoring of the state of subsurface resources. The main information sources of the latter, a brief implementation methodology and an assessment of the state of ground water in the Urals are presented. The problems of conducting state monitoring are associated with the introduction of a unified hydrogeological stratification, the updating of observation points and the instability of the laboratory base.

Keywords: monitoring of underground waters, pollution of underground waters, Ural Federal District.

Гидрогеологический мониторинг представляет собой регулярную систему наблюдений, сбора, накопления и анализа информации о состоянии подземных вод через их динамические показатели. Основная цель мониторинга может быть представлена как информационное обеспечение гидрогеологических прогнозов, необходимых, в том числе, органам управления фондом недр с целью ведения рационального недропользования и защиты населения от возможных чрезвычайных ситуаций, связанных с подземными водами [1–3]. С учетом нарастающих темпов техногенного воздействия на окружающий мир, а также известных климатических перемен очевидна значимая роль мониторинга.

Основной задачей гидрогеологического мониторинга является получение информации для повышения точности оценки гидрогеологической ситуации и достоверности гидрогеологических прогнозов, используемых для принятия управленческих решений разного уровня.

В Российской Федерации основой для мониторинга послужили работы 1960–1980 гг. «режимных» гидростанций, партий и отрядов Мингео СССР [4]. На территории Урала ведение работ с 1941 г. осуществляла Уральская гидростанция, преобразованная в 1945 г. в гидрогеологическую экспедицию. Первоначальные работы на отдельных объектах недропользования постепенно дополнялись региональным изучением и пониманием факторов формирования подземного стока. Активное сотрудничество с институтом ВСЕГИНГЕО, кафедрой гидрогеологии МГУ и другими организациями обеспечивало относительно высокий методический и технический уровень выполнения работ на территории Урала. Например, на основе результатов режимных наблюдений взаимосвязи подземного и поверхностного стока более чем на 300 водохозяйственных и горнопромышленных объектах Урала главным гидрологом гидрорежимной партии Ю.И. Владимировым в конце XX века разработана, апробирована и внедрена в практику

гидрогеологических оценок и прогнозов оригинальная методика оценки модуля подземного стока [5]. Методика и сейчас в эпоху численных моделей эффективно применяется, обеспечивая гарантированные гидрогеологические оценки на принципах общего водного баланса суши [6, 7].

Объектами исследования гидрогеологического мониторинга на территории Российской Федерации рассматриваются участки подземной гидросферы, региональные и локальные гидрогеологические структуры, природные и природно-техногенные водоносные системы [8].

В Уральском федеральном округе (УрФО) подземный сток локализован в пределах водоносных зон Уральской сложной гидрогеологической складчатой области (СГСО) и водоносных горизонтов и комплексов Западно-Сибирского сложного артезианского бассейна (САБ). Совокупно они занимают 99 % площади федерального округа.

Применительно к масштабам наблюдения, источникам финансирования и, соответственно, решаемым задачам, гидрогеологический мониторинг разными авторами подразделяется на три уровня [2, 8, 9]: объектный (локальный), территориальный (региональный), федеральный (государственный).

1. Объектный мониторинг осуществляется на конкретных техногенных объектах: водозаборах, рудниках, свалках и полигонах бытовых и промышленных отходов и прочих объектах техногенного воздействия. Недропользователи и землепользователи организуют и выполняют локальный мониторинг в рамках закона «Об охране окружающей среды» (№ 494-ФЗ) и закона «О недрах» (№ 429-ФЗ). Например, необходимость ведения мониторинга прописывается в лицензиях на добычу полезных ископаемых. Программы (или проекты) согласовываются vказанном выполнения работ В порядке, В законодательных актах. Такие наблюдения иногда включают так называемые «фоновые» скважины, характеризующие естественные природные условия. Это самый массовый вид наблюдения.

Основной задачей ведения локального мониторинга является получение сведений о многолетней работе инженерного объекта в увязке с показателями динамического состояния подземных вод [1]. Ежегодно на территории УрФО недропользователи подготавливают более 3 тыс. отчетов по мониторингу подземных вод. Почти половину (40 %) представляют водохозяйственные предприятия (и службы) Свердловской области.

К сожалению, в Тюменской области с 2018 г. отчеты по ведению локального мониторинга поземных вод отменены. В доступе имеется только годовая форма федерального статистического наблюдения № 4-ЛС «Сведения о выполнении условий пользования недрами при добыче питьевых и технических подземных вод». Статформа содержит годовую величину водоотбора, назначение использования подземных вод, средний для водозаборного участка минимальный и максимальный уровни, а также среднегодовое содержание показателя качества по всем эксплуатируемым скважинам (не более 7 показателей). Вся информация носит исключительно обобщенный характер и находится в прямой зависимости от добросовестности исполнителя.

2. Территориальный гидрогеологический мониторинг организуется на региональном или муниципальном уровне за счет средств областных или муниципальных бюджетов для решения местных специфических задач. Например, территориальная система мониторинга подземных вод действует в Тюменской области и включает наблюдения за гидродинамическим и гидрохимическим состоянием подземных вод с целью отслеживания воздействия техногенных объектов на восьми площадках, включая наблюдательные скважины на территории г. Тюмени.

Еще один пример – город Каменск-Уральский (Свердловская область), расположенный в зоне сочленения Уральской СГСО и Западно-Сибирского САБ. За счет муниципальных средств города на его территории в течение 20 лет бурились и обеспечивались наблюдениями за уровнем и температурой подземных вод более 40 гидроскважин. Это позволило в основном оценить причины подтопления жилых зданий и

инженерных сооружений, выполнить специальное зонирование территории города и ежегодно подготавливать гидродинамические прогнозы в отдельных его микрорайонах. В результате были разработаны и частично реализованы инженерные мероприятия, снизившие общий уровень опасности подтопления как по природным, так и по техническим причинам.

Федеральный мониторинг подземных вод является составной государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) и предназначен для выявления и хронологических изменений гидродинамического, гидрохимического, температурного и ресурсного состояния подземных вод, связанных не только с техногенными причинами, но и с влиянием природных (фоновых) условий [10]. Это наиболее регулярная система наблюдений, унаследованная от режимно-балансовых наблюдений за подземными водами периода СССР. За ее выполнение, в соответствии с Законом о недрах, отвечает Федеральное агентство по недропользованию Российской Федерации (Роснедра). Для практической реализации ГМСН в составе ведомственного учреждения «Гидроспецгеология» действует Центр ГМСН и региональных работ. На территории УрФО практические мероприятия по ГМСН выполняет филиал учреждения – «Уральский региональный центр ГМСН», расположенный в г. Екатеринбурге.

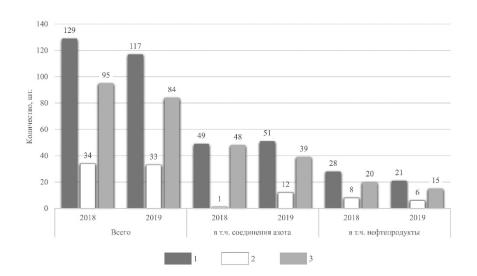
В рамках ГМСН осуществляется сбор, систематизация и анализ данных по всем вышеописанным уровням мониторинга подземных вод. Информационной основой ведения ГМСН локального уровня являются данные ведомственных и локальных наблюдательных сетей, расположенных на водозаборах (как и сами водозаборы), месторождениях твердых полезных ископаемых, работающих с водопонижением, на территориях отдельных промышленных объектов. Источником первых двух видов является территориальный фонд геологической информации (ТФГИ), третьего – недро-, водо- и землепользователи, а также сведения, предоставляемые Роспотребнадзором. Гидрогеохимическая информация о мониторинге подземных вод на месторождениях полезных ископаемых, к сожалению, на большинстве объектов представлена в сокращенном объеме, а данные о наблюдательных скважинах отсутствуют. Информация о состоянии подземных вод на эксплуатируемых месторождениях углеводородов часто вообще недоступна для просмотра из-за наложенного недропользователем ограниченного использования.

Большое внимание уделяется выявлению и учету загрязненных объектов локального уровня. На территории УрФО, по результатам анализа материалов объектного мониторинга, в 2019 г. на 117 питьевых водозаборах (4 % от общего количества) было отмечено комплексное проявление неблагоприятных природных условий формирования подземных вод и воздействия техногенных факторов. Впервые загрязнение было выявлено на 33 водозаборах, и еще на 84 выявленное ранее загрязнение подтвердилось. В подавляющем большинстве (93 %) это мелкие объекты, имеющие водоотбор менее 1.0 тыс. м³/сут. Объем суммарной добычи питьевых подземных вод на таких объектах в среднем составляет менее 1 % от общего объема добычи в округе [11]. Наиболее широко распространенными загрязняющими веществами в подземных водах питьевых водозаборов УрФО в результате техногенного воздействия являются соединения азота и нефтепродукты (рисунок) [12].

Важной задачей государственного уровня является выбраковка недостоверных данных [12], выявление «неблагополучных» участков недр, систематизация и обобщение специализированной информации. Полученные в ходе обработки сведения являются частью информационной основы для оценки и прогнозирования состояния подземных вод на территориях субъектов РФ.

Кроме анализа материалов локального и территориального уровня, ГМСН осуществляет наблюдения за показателями состояния подземных вод водоносных подразделений (динамический уровень, качество и температурные показатели), реализуемые на пунктах государственной опорной наблюдательной сети (ГОНС). На территории УрФО госзаданием сейчас определена работа 130 пунктов ГОНС (из общего объема наблюдаемых объектов 554), большая часть из которых расположена в естественных условиях. На пунктах ГОНС решается задача по получению достоверной информации для региональных прогнозов

уровней грунтовых вод: годовых и сезонных. Уникальные многолетние ряды наблюдений получены на Деевском, Дегтярском, Шадринском и прочих участках наблюдений [11]. Качество воды изучается на 27 % пунктах ГОНС с ответственным выбором определяемых компонентов, тщательным соблюдением правил отбора и консервации проб [1].



Результаты работы по выявлению загрязненных питьевых водозаборов на территории Ур $\Phi$ О в 2019 г.: I — общее количество водозаборов и участков загрязнения (цифра вверху), на которых выявлено загрязнение подземных вод; 2 — общее количество водозаборов и участков загрязнения, на которых загрязнение выявлено впервые; 3 — общее количество водозаборов и участков загрязнения, на которых подтверждено выявленное ранее загрязнение.

Расположение пунктов обусловливают следующие факторы:

- наличие эксплуатационной нагрузки на тот или иной гидрогеологический стратон;
- интенсивность недропользования и других видов техногенной нагрузки;
  - комплекс природных факторов (геоморфологических, климатических, гидрологических);
- гидрогеологическая стратификация.

Последние 10 лет происходит внедрение унифицированной гидрогеологической стратификации (УГС) [13], которая позволила бы проводить анализ гидрогеологических данных не только по площади (административным единицам, гидрогеологическим структурам І–ІІ порядка), но и в разрезе основных гидрогеологических подразделений. Большие сложности встречены при внедрении УГС в уральские информационно-аналитические базы данных ГМСН по разным причинам, в том числе ввиду отсутствия единства геологических служб по вопросу применения стратификации при постановке и приемке геологоразведочных работ, а также при их лицензировании.

Важным моментом при ведении мониторинга является информационное взаимодействие со смежными природными средами [1, 8, 9, 14] или системами экологического мониторинга, в первую очередь атмосферы (гидрометеонаблюдения) и поверхностной гидросферы (мониторинг водных объектов). Например, от подсистемы мониторинга подземных вод в структуру Росводресурсов ежегодно передаются данные о выявленном загрязнении на водозаборах и участках загрязнения, большой блок сводной информации о величине запасов, добычи и использования подземных вод и т. п.

Основные результаты мониторинга подземных вод представлены на информационном сайте Центра ГМСН и РР, а также в отчетах, информационных бюллетенях и аналитических обзорах [10]. Материалы ведения ГМСН активно применяются для подготовки государственных докладов, справок, гидрогеологических заключений по тематическим работам, а также при выполнении всего спектра геологоразведочных работ на подземные воды, при инженерных изысканиях и т.п.

К основным проблемами ведения ГМСН на территории УрФО, можно отнести сложность замены периодически выходящих из строя пунктов ГОНС по причине технической неисправности в результате градостроительной деятельности, благоустройства, землеустройства и, наконец, просто бытового вандализма. Например, из-за выхода наблюдательных скважин из строя по техническим причинам и потери в результате отчуждения земель в собственность за период 2005–2018 гг. по территории Российской Федерации ГОНС сократилась с 6000 до 3000 скважин, то есть более чем на 50 % [14]. Для предотвращения дальнейшего сокращения пунктов ГОНС необходимо решить непростой вопрос о присвоении им статуса федеральной собственности и передаче в оперативное управление в Центр ГМСН.

Достаточно серьезной проблемой последних лет является отсутствие постоянной лаборатории для контроля качества подземных вод в многолетнем разрезе, что связано с современными условиями выполнения работ по государственному заданию (правоприменение положений закона № 44-ФЗ).

В целом, ведение мониторинга подземных вод рассматривается в системе недропользования как важнейшая гидрогеологическая задача, требующая адаптации в изменяющихся экономических и законодательных реалиях.

## Список литературы

- 1. Шестаков В.М. Мониторинг подземных вод принципы, методы, проблемы // Геоэкология. 1993. № 6. С. 3–11.
- 2. Положение о порядке осуществления государственного мониторинга состояния недр Российской Федерации: утв. Приказом МПР России от 21.05.2001 № 433 // Собрание законодательства РФ. 2000. № 40. Ст. 3971.
- 3. Munn R.G. Global environmental monitoring system (GEMS) / Action plan for Phase // SCOPE Rep.3 Toronto -1973. P. 37-42.
- 4. Челидзе Ю.Б. 20-летняя история и современное состояние государственного мониторинга состояния недр // Разведка и охрана недр. 2014. № 8. С. 31–38.
- 5. Владимиров Ю.И. Изменение стока малых рек при отборе подземных вод горноскладчатой части Урала // Сборник работ по гидрологии. № 18. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 17–44.
- 6. Новиков В.П., Копылов Д.В. Уточненная гидрогеологическая модель объектов Уральской складчатой области // Разведка и охрана недр. 2018. № 3. С. 36-41.
- 7. Елохина С.Н., Владимиров Ю.И. К вопросу оценки эксплуатационных запасов подземных вод // Известия УГГА. Вып. 18. Сер.: «Геология и геофизика». Екатеринбург, 2003. С. 211–215.
- 8. Язвин Л.С., Боревский Б.В. Концепция государственного мониторинга состояния недр Российской Федерации. Вторая конференция партнеров и пользователей «Геолинк Консалтинг». [Электрон. ресурс]. 2001. Режим доступа: http://www.geolink-consulting.ru/company/confer2/yazvin.html (дата обращения 10.02.2021).
- 9. Мироненко В.А. О концепции государственного мониторинга России // Геоэкология. 1993. № 1. С. 19–29.
- 10. Спектор С.В., Прачкина Т.В. Федеральная система мониторинга подземных вод. Информационные ресурсы и информационная продукция // Недропользование XXI век. 2018. № 1. С. 76-82.
- 11. Информационный бюллетень о состоянии недр территории Уральского федерального округа Российской Федерации за 2019 г. Вып. 20 / Под. ред. С.Н. Елохиной [Электрон. pecypc]. https://gmsn-ural.ru/wp-content/uploads/2021/02/Bjulleten UFO 2019.pdf (дата обращения 26.01.2021).
- 12. Сергеева А.С., Кислякова А.А. Участки загрязнения подземных вод, их выявление и учет в Уральском федеральном округе // Современное состояние, тенденции и перспективы развития гидрогеологии и инженерной геологии: Сборник научных трудов. Матер. II Междунар. науч.-методич. конф., СПб, 23-24 мая 2017 г. [Электрон. ресурс] 1 электрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см. / Ред. кол. В.С. Литвиненко (председат.) и др. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. С. 185–190.
- 13. Пугач С.Л., Кокорева С.В. Основные положения и принципы унифицированной гидрогеологической стратификации гидрогеологических структур территории Российской Федерации // Разведка и охрана недр. 2013. № 10. С. 25–29.
- 14. Анненков А.А., Спектор С.В. Некоторые проблемы нормативноправового и информационного обеспечения государственного мониторинга состояния недр // Разведка и охрана недр. 2019. № 3. С. 11–17.

# ОЦЕНКА НЕГАТИВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-53-57

Жульмина Г.А., Балобаненко А.А.

Филиал «Сибирский региональный центр ГМСН» ФГБУ «Гидроспецгеология», Томск, mail@sfo.geomonitoring.ru

**Аннотация**. В работе дана характеристика природных и техногенных факторов геологической среды, оказывающих влияние на состояние подземных вод и его изменение, а также на основании интегрального показателя суммы факторов выполнено районирование Байкальской природной территории по степени негативного изменения состояния подземных вод.

Ключевые слова: Байкальская природная территория, подземные воды, загрязнение, защищенность.

**Abstract.** The paper gives a characteristic of natural and man-made factors of the geological environment that affect groundwater, and on the basis of the integral indicator of the sum of factors, the Baikal natural territory was zoned according to the degree of negative change in the state of groundwater.

**Key words:** Baikal natural territory, ground water pollution, protection.

В целях сохранения уникальной экологической системы оз. Байкал и предотвращения негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на ее состояние в соответствии с Федеральным законом от 01.05.1999 г. № 94-ФЗ (ред. от 08.12.2020 г.) «Об охране озера Байкал» и Распоряжением Правительства РФ от 27.11.2006 г. № 1641-р «О границах Байкальской природной территории» установлено экологическое зонирование Байкальской природной территории и выделяются: центральная экологическая зона, буферная экологическая зона и экологическая зона атмосферного влияния.

В пределах Байкальской природной территории в результате деятельности человека происходит комплексное техногенное воздействие на геологическую среду, в том числе на состояние подземных вод. Для его характеристики выполнено районирование территории по степени опасности негативных изменений состояния подземных вод. Районирование проведено по интегральному показателю, характеризующему влияние как природных (защищенность, природная некондиционность подземных вод, распространение многолетнемерзлых пород, принадлежность к особоохраняемым природным территориям), так и техногенных (качество подземных вод и нарушение их гидродинамического режима) факторов (таблица). Весовой коэффициент каждого фактора определяется методом экспертных оценок.

В основу анализа защищенности подземных вод положена методика ВСЕГИНГЕО, разработанная В.М. Гольдбергом [1,2].

На территории Центральной экологической зоны грунтовые воды Усть-Селенгинского межгорного артезианского бассейна относятся к категории незащищенных, на отдельных участках – слабозащищенных.

На территории буферной экологической зоны в наименее благоприятных условиях по природной защищенности находятся подземные воды долины реки Селенги. По условиям защищенности от загрязнения с поверхности трещинные и трещинно-жильные воды зоны трещиноватости горно-складчатых областей относятся к незащищенным. Грунтовые воды бассейнов межгорных впадин забайкальского типа незащищенные, и при более интенсивной техногенной нагрузке качество их может резко снизиться. Подземные воды нижележащих водоносных комплексов в нижнемеловых и юрских отложениях являются преимущественно незащищенными, и лишь в центре Боргойской, Ичетуйской, Илькинской, Курбинской впадин, где они перекрыты мощной толщей четвертичных отложений, их можно отнести к условно защищенным.

На территории экологической зоны атмосферного влияния грунтовые воды не защищены от поверхностного загрязнения. Кроме того, напорные подземные воды являются незащищенными в следующих случаях:

- напорные воды в речных долинах, если водоупор прорезается руслом реки;

- в карстовых районах, если водоупор захватывается карстовыми процессами;
- на участках со сложными тектоническими условиями в зоне активного водообмена (учитываются возможности интенсивных неотектонических движений).

Факторы негативного изменения состояния подземных вод

Критерии				
	защищенные	1		
	относительно	3		
Защищенность подземных вод	защищенные	3		
	слабо защищенные	5		
	незащищенные	7		
Природная некондиционность	допустимая	2		
подземных вод	умеренно опасная	3		
Раситествомому	сплошная	1		
Распространение	талики	2		
многолетнемерзлых пород	отсутствие	3		
Наличие особо охраняемых	в зоне ООПТ	1		
природных территорий	вне зоны ООПТ	2		
	оптимальное	1		
Качество подземных вод	допустимое	4		
качество подземных вод	умеренно опасное	7		
	опасное	10		
Нарушение	допустимое	1		
гидродинамического режима	слабое	2		
подземных вод	сильное	3		
	низкая	<10		
Степень негативного изменения	средняя	1–14		
состояния подземных вод	высокая	15–19		
	чрезвычайно высокая	>20		

#### Природная некондиционность подземных вод

В пределах Байкальской природной территории выделяются геохимические провинции, характеризующиеся высоким уровнем фоновых концентраций элементов, которые близки ПДК (F, Fe, Mn, Sr, Se, As, Be).

На территории экологической зоны атмосферного влияния в пределах Ангаро-Ленского артезианского бассейна в гидрогеохимическом разрезе наблюдается несколько зон:

- верхняя благоприятные для эксплуатации подземные воды гидрокарбонатного кальциевого состава;
- зона глеевых вод с низкими положительными значениями Eh и высокими концентрациями Fe и Mn;
- зона гидрокарбонатных натриевых вод с повышенными концентрациями сероводорода и фтора.

Из микрокомпонентов, превышающих ПДК, эпизодически присутствуют Si, Ba, Sr, Li, Cd, B. Повышенные значения минерализации и жесткости отмечаются в зоне недостаточного увлажнения, пространственно совмещающейся с повышенной загипсованностью пород.

На территории буферной экологической зоны выделяются основные геохимические зоны, отличающиеся по условиям формирования химического состава подземных вод:

- бассейны трещинных вод гидрогеологических складчатых областей;
- бассейны подземных вод межгорных впадин забайкальского типа.

В подземных водах зоны трещиноватости кристаллических пород хребтов микрокомпоненты содержатся в незначительных количествах, отмечается повышенная

концентрация Si, Al, F, Cd, Fe, Mn, Rn, α-активность. В зоне недостаточного увлажнения концентрации Si, Al, F, Li, Se, Sr, Fe, Mn превышают фоновые значения и нормы ПДК, в них повышены минерализация и общая жесткость.

В грунтовых водах бассейнов межгорных впадин забайкальского типа довольно часто отмечается природное повышенное содержание Fe, Mn, F. В грунтовых водах Гусиноозёрской, Оронгойской, Иволгинской впадин отмечается повышенное содержание U, связанное с привнесением урансодержащих вод по зонам тектонических нарушений из районов урановых проявлений хр. Хамар-Дабан. На отдельных участках этих впадин в водах обнаружена ртуть в чрезвычайно опасных концентрациях.

Трещинно-жильные воды тектонических нарушений обогащены F, Mo, W, Cd и другими тяжелыми металлами.

#### Многолетнемерзлые породы

Подземные воды территории распространения сплошной мерзлоты отнесены к защищенным от загрязнения. На территориях с островным и прерывистым распространением многолетнемерзлых пород их влияние на условия формирования и распространения подземных вод незначительно, поэтому они незащищены от загрязнения.

Особо охраняемые природные территории характеризуются отсутствием хозяйственной деятельности, опасности негативного изменения состояния подземных вод здесь практически отсутствуют.

#### Качество подземных вод

Анализ качественного состояния подземных вод Байкальской природной территории в техногенно-нарушенных условиях проведен за 2010–2020 гг. Загрязнение подземных вод фиксируется в районах их добычи для питьевого и хозяйственно-бытового, а также технического водоснабжения, их извлечения на объектах разработки МТПИ, извлечения нефтепродуктов и загрязненных нефтепродуктами подземных вод предприятиями по переработке и хранению углеводородного сырья, сброса сточных вод, влияния сельскохозяйственной деятельности, комплексного техногенного воздействия городских и промышленных агломераций и узлов.

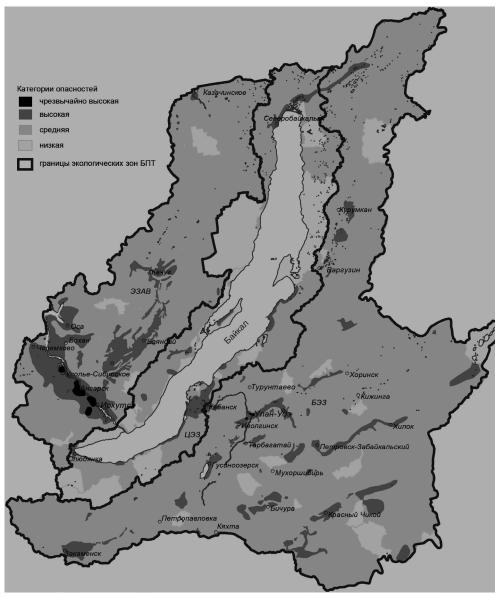
Критерием оценки загрязнения подземных вод является соответствие их химического состава действующим нормативам: оптимальному состоянию подземных вод соответствует содержание элементов менее ПДК; допустимому состоянию — содержание элементов 1 и 2-го класса опасности до 2 и 5 ПДК, а элементов 3 и 4-го класса опасности до 10 ПДК, обобщенные показатели — до 10–15 ПДК; умеренно опасному состоянию — содержание элементов 1 и 2-го класса опасности более 2 и 5 ПДК, элементов 3 и 4-го класса опасности — 10-100 ПДК, обобщенных показателей — более 15 ПДК; опасному состоянию — содержание элементов более 100 ПДК.

На территории Усолье-Сибирской, Ангарской и Иркутской промышленных агломераций в течение многих десятилетий высок уровень техногенного влияния на все природные среды, в пределах которых подземные воды загрязнены токсичными веществами 1, 2, 3 и 4-го класса опасности более 100 ПДК (Hg, Be, As, бензол, Pb, Ni, Li, Br, B, Cd, Fe, F, Mn, Cr, ксилол, толуол, НП, Ф), качество подземных вод оценено как чрезвычайно опасное. На территории Шелеховского промышленного узла содержание элементов 1-го класса опасности (As, B, Fe, Mn, F, НП) находится в интервале 10–100 ПДК, качество подземных вод тоже отнесено к опасному.

На территории Улан-Удэнского и Нижнеселенгинского промышленных узлов и в зоне влияния Байкальского ЦБК, в пределах которых подземные воды загрязнены токсичными веществами 1–4-го класса опасности в интервале 10-100 ПДК (As, Be, Hg, Pb, Al, F, Mn, Cd, Ni, НП, Ф, Fe, лигнин), качество подземных вод оценено как умеренно опасное. В зоне влияния Гусиноозерской ГРЭС элементы 1 и 2-го класса опасности содержатся в подземных водах в количествах менее 10 ПДК (As, Pb, Mn), качество подземных вод – умеренно опасное.

На остальной территории БПТ качество подземных вод отнесено к допустимому.

Таким образом, на основании комплексного анализа всех охарактеризованных факторов в пределах Байкальской природной территории выделено четыре категории территорий по степени опасности негативных изменений состояния подземных вод: *чрезвычайно высокая, высокая, средняя, низкая* (рисунок).



Районирование Байкальской природной территории по степени опасности негативных изменений состояния подземных вод.

К районам с низкой степенью опасности негативных изменений состояния подземных вод отнесены особо охраняемые природные территории, где угроза негативного изменения состояния подземных вод даже недостаточно защищенных и незащищенных водоносных подразделений отсутствует, ввиду изъятия таких систем (решениями органов государственной власти) полностью или частично из хозяйственного использования и установления на них режима особой охраны.

К районам *средней степени опасности негативных изменений состояния подземных вод* отнесена большая часть Байкальской природной территории. В таких районах подземные воды не испытывают непосредственного техногенного влияния и/или техногенные нарушения не влекут необратимых для подземных вод последствий. Ландшафтные комплексы обладают естественным потенциалом самовосстановления. Источники техногенной нагрузки ограничены локальными объектами, имеющими

незначительное влияние на поземные воды, но в силу недостаточной защищенности и незащищенности подземных вод, а также повсеместного природного несоответствия качества вод (минерализация, SO<sub>4</sub>, Fe, Mn, F, Al и др.) состояние подземных вод в пределах таких комплексов легко может быть нарушено. Факторы, изменяющие гидродинамическую и гидрохимическую устойчивость экологического состояния подземных вод, незначительны.

**Высокая степень опасности негативных изменений состояния подземных вод** характерна для районов, где наблюдается локальное воздействие источников техногенной нагрузки и/или их значительная концентрация. Подземные воды загрязнены умеренно опасными веществами, и интенсивность загрязнения не превышает 100 ПДК (обычно значительно ниже – в пределах 30–40 ПДК).

К таким районам отнесены территории Улан-Удэнского, Нижнеселенгинского, Гусиноозерского и Южнобайкальского промышленных узлов, а также участки добычи твердых полезных ископаемых. Эти территории используются для ограниченной хозяйственной деятельности. Естественные и техногенные факторы, изменяющие природную среду, значительны.

**Чрезвычайно высокая степень опасности негативных изменений состояния подземных вод** характерна для площадей распространения незащищенных подземных вод в связи с многолетней техногенной нарушенностью геологической среды: территории Усолье-Сибирской, Ангарской и Иркутской промышленных агломераций и Шелеховского промышленного узла. Факторы, изменяющие гидродинамическую и гидрохимическую устойчивость подземных вод, здесь значительны. Техногенное воздействие оказывают предприятия АО «Ангарская нефтехимическая компания», включающая товарно-сырьевое производство (ТСП-1,2), нефтеперегонный завод (НПЗ), химический завод, свалку промышленных отходов и др. Техногенные геохимические аномалии в подземных водах занимают локальные участки, отмечаются аномалии катастрофического уровня опасности, в том числе аномалии с чрезвычайно опасными элементами (1-й класс опасности). Интенсивность загрязнения подземных вод превышает 100 ПДК, на отдельных участках — сотни и тысячи ПДК.

## Список литературы

- 1. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М.: Недра, 1984. 266 с.
- 2. Методические рекомендации по гидрогеологическим исследованиям и прогнозам для контроля за охраной подземных вод / Сост. В. М. Гольдберг. М.: ВСЕГИНГЕО, 1980. 46 с.

# КИСЛЫЕ СУЛЬФАТНО-ХЛОРИДНЫЕ ВОДЫ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ о. ПАРАМУШИР, КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-58-62

Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Волошина Е.В.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, keg@kscnet.ru

Аннотация. Изучен химический состав кислых подземных вод, разгружающихся в районе действующего вулкана Эбеко в северной части о. Парамушир. Выявлено, что источники верховьев рек Птичья, Снежная и Горшкова относятся к Ca-SO<sub>4</sub>-Cl-типу вод с температурами в диапазоне от 9 до 16 °С и минерализацией до 1.1 г/л. По соотношению макрокомпонентов они близки к Верхнеюрьевским ультракислым термальным источникам, локализованным в верховьях р. Юрьева. Возможно, все кислые подземные воды данного района имеют единую область формирования, но разные пути фильтрации.

Ключевые слова: термальные источники, химический состав, остров.

**Abstract.** The chemical composition of acid groundwater discharging near of the Ebeko volcano in the northern part of Paramushir Island has been studied. It was revealed that the springs of the Ptichya, Snezhnaya and Gorshkova river valleys have the Ca-SO<sub>4</sub>-Cl-type of waters with temperatures ranging from 9 to 16 °C and salinity up to 1.1 g/L. They are close to the Verkhne-Yuryevsky ultra-acid thermal springs located in the upper part of the Yurieva river by chemical composition and by the ratio of macrocomponents. It is possible that all acidic groundwaters in this area have a single formation area, but different filtration ways.

Key words: thermal springs, chemical composition, island.

Остров Парамушир является одним из наиболее крупных Курильских островов (рис. 1). Он вытянут с юго-запада на северо-восток более чем на 100 км при средней ширине 20–25 км. В пределах острова расположены более десяти вулканов четвертичного возраста, пять из которых являются действующими. В южном кратере и на внешних склонах современного конуса самого северного из них, активного вулкана Эбеко, расположены многочисленные фумаролы с температурами на выходе от 100–160 °C, ультракислые (рН<3) кипящие водные и водно-грязевые котлы, бессточные или с минимальным стоком, а также горячие источники. Дно среднего кратера занимает холодное озеро.

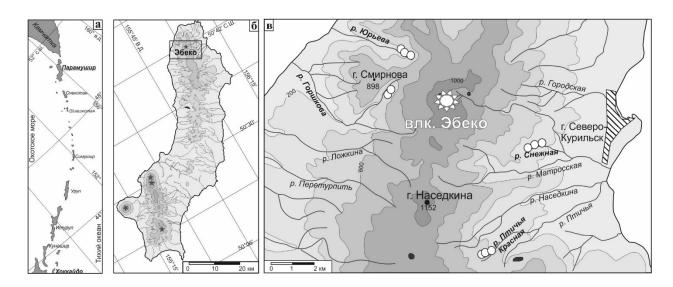


Рис. 1. a – Курильская островная дуга;  $\delta$  – о. Парамушир;  $\epsilon$  – район исследования.

На северо-западном склоне вулкана в 2.5 км от кратерной зоны в верховьях р. Юрьева (рис. 1,  $\epsilon$ ) находится крупный очаг разгрузки ультракислых (рH=1.0–1.5) вод с температурой до 80.0–85.5 °C и минерализацией до 14~г/л — Верхнеюрьевские источники. Выходы встречаются на протяжении  $\sim 700~\text{M}$  вдоль и непосредственно в русле реки. Всего насчитывается около 30~основных выходов с общей разгрузкой, по нашим оценкам,  $\sim 200~\text{п/c}$ .

Помимо вышеописанных источников, для северной части острова Парамушир характерно наличие мощных (до  $1\,\mathrm{m}^3/\mathrm{c}$ ) очагов разгрузки подземных кислых (pH<4) сульфатных и сульфатно-хлоридных вод с температурами до  $18\,^{\circ}\mathrm{C}$ . Эти выходы формируют истоки ряда рек, дренирующих восточные и западные склоны северной части хребта Вернадского, включая постройку вулкана Эбеко.

Если термальные воды, разгружающиеся в долине р. Юрьева, рассматриваются в значительном количестве публикаций начиная с середины XX в., то данные по геохимии других кислых вод района практически отсутствуют.

Цель данной работы — на основании результатов полевых исследований 2019-2020 гг. кратко рассмотреть химический состав вод источников, расположенных в верховьях рек Птичья, Снежная, Горшкова (рис. 1,  $\epsilon$ ), дать их сравнительную характеристику и затронуть вопросы их происхождения.

## Местоположение и краткая характеристика источников

Местоположение источников, рассматриваемых в данной публикации, представлено на рис. 1.

Источники р. Птичья Красная. Один ИЗ истоков р. Птичья формируется преимущественно за счет многочисленных выходов кислых (рН=3.2-4.0) подземных вод. Разгрузка осуществляется во фронтальной части древних лавовых потоков одного из четвертичных вулканов на контакте с подстилающими вулканогенными отложениями. Источники нисходящие, со значительным напором и дебитом от 1 до 10 л/с. Температура воды составляет 12–18 °C, что при среднестатистической температуре выходов холодных подземных вод исследуемого района, равной 5-6 °C, позволяет отнести их к термальным. Все источники формируют единый ручей. При смешении его с другим водотоком, образованным за счет таяния многолетнего снежника, происходит железосодержащих минералов. Сформированный этими отложениями красно-бурый плащ, простирающийся по дну русла на несколько сотен метров, дал название реки Птичья Красная. Измеренный расход ее ниже источников составляет 1.05 м<sup>3</sup>/с.

Источники р. Снежная. В верховьях р. Снежная находится линейная разгрузка кислых (рН=3.8–4.5) подземных вод протяженностью ~250 м, состоящих из более чем десяти крупных источников с дебитом до 8–10 л/с каждый и температурой 8–11 °С. Разгрузка осуществляется на контакте древнего лавового потока одного из побочных конусов вулкана Эбеко с подстилающими породами. За счет данных выходов и таяния снежника в пониженном участке рельефа образовалось озеро, сток из которого и дает начало р. Снежная. По дну русла реки практически до самого устья наблюдается рыхлый осадок рыжего цвета.

Источники р. Горшкова. Источники находятся в верхнем течении правого истока реки, формирующегося за счет таяния снежника на западном склоне вулкана Эбеко. Разгрузка термальных ( $T=14-17\,^{\circ}C$ ) кислых (pH=2.9-3.3) вод осуществляется на крутых бортах реки на высоте  $0.5-2.0\,$  м над урезом реки из гидротермальноизмененных отложений, выступающих из-под лавовых потоков вулкана. Всего здесь обнаружено пять отдельных выходов общим расходом  $\sim 30\,$  л/с.

## Результаты и обсуждение

Общий химический состав кислых подземных вод, встреченных в долинах рек Птичья, Снежная и Горшкова, представлен в таблице.

Как указывалось выше, pH воды исследуемых источников находится в пределах 3.0–4.3, температура колеблется от 8 до 18 °C. В анионном составе преобладают сульфат- и хлорионы, постоянно в небольших количествах присутствует  $F^-$ . В катионном составе основным компонентом является  $Ca^{2+}$  (таблица). Вместе с тем в геохимии вод каждой группы есть некоторые отличия.

Вода источников рек Птичья Красная и Горшкова более минерализованная, чем у источников в долине р. Снежная. Максимальная температура (18 °C) и наиболее высокие концентрации большинства компонентов, включая фтор (9.4 мг/л) и железо общее (39 мг/л),

обнаружены в грифоне. Минимальный рН (2.9) зафиксирован в одном из источников р. Горшкова.

<b>1</b> 7	U	Π ( / )
Химическии состав те	мальных вол северной ч	асти о. Парамушир (мг/л)
THIMIT ICCRITIT COCTUB TO	madibilibilit bod cepepinen i	acin of mapanityming (mirror)

Проба	Место отбора	Дата отбора	T, °C	рН	F	Cl	SO <sub>4</sub>	Na	K	Ca	Mg	SiO <sub>2</sub>	Fe	Al
	Р. Снежная													
123/20	источник	28.07.2020	11.2	4.50	0.2	43.1	113	10.8	3.3	41.7	7.4			
124/20	источник	28.07.2020	8	4.53	0.2	33.1	91.5	9.6	2.5	32.4	5.5			
125/20	озеро (сток)	28.07.2020	13.0	3.86	0.2	47.2	108	9.9	2.9	40.1	7.1			
Р. Горшкова														
173/20	источник	02.08.2020	16.7	3.13	1.7	94.4	308	18.6	6.6	49.4	13.3	21.9	9.0	26.9
175/20	источник	02.08.2020	13.9	3.27	1.7	107	309	22.0	6.0	56.4	17.7	23.3	2.0	23.8
176/20	источник	02.08.2020	16.8	2.95	3.1	196	570	35.6	10.0	69.9	27.8	29.0	22.3	25.6
	Р. Птичья													
2/19	источник	15.08.2019	12.2	4.04	3.8	146	340	24.5	9.7	71.6	16.6	79.0	0.5	31.1
3/19	источник	15.08.2019	13.1	4.05	3.9	193	327	28.2	10.4	84.0	20.0	81.2	0.5	37.4
5/19	грифон	15.08.2019	17.8	3.28	9.4	279	485	64.7	17.4	171	52.4	80.6	38.7	20.2
	Р. Юрьева (источники ниже основной разгрузки)													
204/20	источник	07.08.2020	19.8	3.16	4.8	241	784	49.1	17.8	99.9	30.6	49.5	2.4	54.0
205/20	источник	07.08.2020	18.6	3.21	4.7	240	786	49.4	17.8	104	30.6	50.5	2.4	51.3

Содержание кремнекислоты в термальных водах р. Птичья Красная выше, чем в остальных выходах. Источники р. Снежная характеризуются самыми низкими концентрациями макрокомпонентов, более низкими температурами (8–11 °C) и самыми высокими значениями рН. Реки, дренирующие источники ниже разгрузок, приобретают схожий с источниками химический состав при меньшей минерализации и температуре в более высоких значениях рН (таблица).

На диаграмме Пайпера показаны химические составы анионов ( $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $F^-$ ) и катионов ( $Na^+ + K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ) для всех трех групп источников (рис. 2, a).

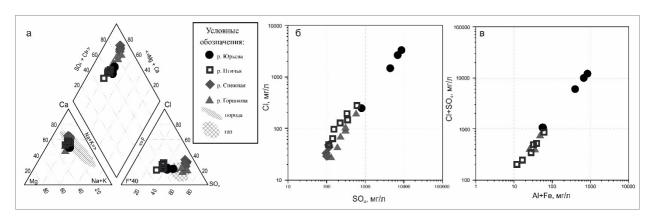


Рис. 2. Диаграмма Пайпера для кислых термальных вод северной части о. Парамушир (%-экв) (a), соотношение основных анионов Cl/SO<sub>4</sub> (мг/л) ( $\delta$ ) и (Al+Fe)/(Cl+SO<sub>4</sub>) (мг/л) ( $\epsilon$ ).

Для сравнения на рисунках показаны составы разнотемпературных термальных источников долины р. Юрьева, а также области составов вулканических пород (катионы) и высокотемпературных вулканических газов (анионы) по данным, использованным в работе [1]. Из диаграмм видно, что анионный состав всех исследуемых термальных вод, включая

состав Верхне-Юрьевских источников, а также вулканических газов, очень близок. Во всех источниках наблюдается линейная зависимость межу  $SO_4^{2-}$  и  $Cl^-$  (рис. 2,  $\delta$ ), все точки формируют единый тренд в сторону Верхне-Юрьевских источников с мольным отношением  $Cl/SO_4 \sim 1$ .

Катионный состав источников (рис. 2, a) также схож во всех группах и подобно Верхнеюрьевским источникам, в основном, отвечает изохимическому растворению вулканической породы. Вмещающие породы вулканического хребта Вернадского, включая постройку вулкана Эбеко, представлены преимущественно андезитами. Средний известковощелочной (островодужный) андезит имеет 7.2 % CaO, 3.2 % Na<sub>2</sub>O и 1.3 % K<sub>2</sub>O [2], т. е. преобладающим катионом является кальций, что находит отражение в составе термальных вод. Такое распределение характерно для большинства кислых вулканических вод с pH<4, распространенных на Курильских островах [1]. Концентрации основных катионов коррелируют с концентрациями анионов, образуя единые линии смешения для каждой из групп. На рис. 2, a, показана зависимость суммы Fe и Al от суммы основных анионов термальных вод рек Птичья Красная и Горшкова, также формирующих единый тренд в сторону Верхнеюрьевских источников.

Такое поведение анионов и катионов может означать, что условия формирования всех исследуемых термальных вод схожи между собой. Различия в основных параметрах обусловливается различной степенью разбавления с метеорными водами на пути движения к зоне разгрузки. Можно предположить, что все источники являются поверхностными проявлениями единой гидротермальной системы, преимущественно связанной с вулканом Эбеко. Неравномерное распределение по площади выходов термальных вод может быть связано с геолого-структурными и гидрогеологическими условиями района. Территория северной части о. Парамушир находится в пределах Аляскинской антиклинали [3], сформировавшейся в раннем плиоцене, в современной структуре которой наблюдаются элементы асимметрии. Северо-западное крыло антиклинали наклонено более круго, чем юго-восточное. Последующая в раннеплейстоцен-голоценовое время (Q<sub>1</sub>-Q<sub>4</sub>) интенсивная вулканическая деятельность в пределах хребта Вернадского привела к образованию лавовых покровов, перекрывающих дочетвертичные отложения в западной и северо-западной части района. Следовательно, в соответствии со структурным положением, водоносный горизонт ультракислых высокоминерализованных вод, сформированный в постройке вулкана Эбеко [4], может разгружаться в двух основных направлениях: в северо-западном и юго-восточном. Фильтрационный путь в северо-западном направлении относительно короткий при высоком гидравлическом градиенте, что приводит к появлению ультракислых горячих источников в долине р. Юрьева. В юго-восточном направлении происходит латеральный растек. Разгрузка на поверхности осуществляется на различном расстоянии от вулкана в долинах рек восточного склона хребта Вернадского в виде сильно разбавленных холодными грунтовыми водами кислых источников. Полученные результаты носят предварительный характер и для подтверждения требуют дополнительных исследований как химического и изотопного состава, так и детальных данных по геолого-структурным особенностям исследуемого района.

#### Выводы

Термальные воды вулканов бассейнов рек Птичья Красная, Снежная и Горшкова относятся к кислым сульфатно-хлоридным кальциевым водам, широко распространенным в районах островодужного вулканизма.

Схожий химический состав, соотношения макрокомпонентов и типовые условия разгрузки позволяют предположить наличие единого водоносного горизонта, приуроченного к постройке действующего вулкана Эбеко, разгружающегося в долинах рек на разном расстоянии от него.

Авторы выражают искреннюю благодарность Л.В. Котенко за всестороннюю помощь при проведении полевых работ. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20-05-00517\20.

## Список литературы

- 1. Taran Y., Kalacheva E. Acid sulfate-chloride volcanic waters; Formation and potential for monitoring of volcanic activity // Journal of volcanology and geothermal research, 2020. V. 405. 107036.
- 2. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.
- 3. Гаврилов В.К., Соловьева Н.А. Вулканогенно-осадочные формации геоантиклинальных поднятий Малых и Больших Курил. Новосибирск: Наука, 1973. 152 с.
- 4. Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T. et al. Volcano-hydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur // Journal of volcanology and geothermal research, 2016. V. 310. P. 118–131.

# ГИДРОГЕОЛОГИЯ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

#### Каюкова Е.П.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, epkayu@gmail.com

Аннотация. В 2020 г. кафедре гидрогеологии Санкт-Петербургского (Ленинградского) государственного университета исполнилось 90 лет. Первым заведующим кафедрой (в то время — кафедра подземных вод) был Борис Леонидович Личков — выдающийся ученый, философ, специалист широкого профиля, доктор геолого-минералогических наук (1942), почетный член Географического общества. Именно Б.Л. Личков — основоположник научной школы гидрогеологов Ленинградского государственного университета. За годы существования кафедра гидрогеологии подготовила большое количество нужных стране специалистов, однако в настоящее время для кафедры наступили не лучшие времена. Так нужны ли стране специалисты-гидрогеологи? Состоится ли Второй гидрогеологический съезд?

Ключевые слова: гидрогеология, образование, съезд гидрогеологов.

**Abstract.** In 2020, the Department of Hydrogeology of St. Petersburg (Leningrad) State University celebrated its 90th anniversary. The first head of the department (at that time - the Department of Groundwater) was Boris Leonidovich Lichkov - an outstanding scientist, philosopher, generalist, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences (1942), an honorary member of the Geographical Society. B.L. Lichkov is the founder of the scientific school of hydrogeologists at the Leningrad State University. Over the years of its existence, the Department of Hydrogeology has trained a large number of specialists needed by the country, but at present, not the best times have come to the Department. Does the country need hydrogeologists? Will the Second Hydrogeological Congress take place?

Key words: hydrogeology, education, congress of hydrogeologists.

В апреле 2007 г. в Санкт-Петербургском государственном университете состоялся международный симпозиум «Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы», который собрал большое количество крупных гидрогеологов со всего постсоветского пространства. Такое крупное мероприятие было посвящено 70-летию создания кафедры гидрогеологии ЛГУ (СПбГУ), которая долгие годы сохраняла ведущие позиции в стране [1, 2].

Согласно официальной истории Ленинградского государственного университета, кафедра гидрогеологии была основана в 1936 г. на геолого-почвенном отделении геолого-почвенно-географического факультета (ГПГ) [3]. Заведующим кафедрой был назначен С.С. Кузнецов, геолог широкого профиля. Личность незаурядная, под началом Сергея Сергеевича геологический факультет функционировал в военное время, он руководил эвакуацией в Саратов и там проявил себя хорошим руководителем в должности декана [4].

Наука о подземных водах в Ленинградском государственном университете как новое научное направление сформировалась в начале XX в. На географическом факультете в 1930 г. была образована кафедра подземных вод, которой до 1934 г. заведовал Б.Л. Личков. Именно Борис Леонидович по праву является основоположником научной школы гидрогеологов Ленинградского государственного университета [5].

В результате реорганизации университета в соответствии с Постановлением коллегии Наркомпроса РСФСР от 28.04.1931 г. кафедра подземных вод была ликвидирована, однако специальность «гидрология» сохранилась в географическом секторе, где проф. Б.Л. Личков читал полный курс «Подземные воды». В сентябре 1932 г. сектора были преобразованы в отделения. В этот же год был существенно увеличен прием студентов на специальность «гидрология». В октябре 1932 г. на географическом отделении были возрождены (прежде упраздненные) кафедры, и в том числе кафедра подземных вод, заведующим которой был назначен Б.Л. Личков. В первой половине 30-х гг. на кафедре гидрологии географического факультета началась дифференцированная подготовка специалистов-гидрологов (океанологи, «речники», «комплексники», «подземники»). Это был период, когда стране требовались специалисты-гидрогеологи. «Подземниками» тогда называли студентов ЛГУ,

обучавшихся по специальности «гидрология подземных вод», их учебная программа вместила целый ряд геологических дисциплин. Одним из преподавателей был С.С. Кузнецов.

Борис Леонидович Личков появился в Ленинграде в 1927 г. Приехал он из Киева вместе со своей семьей по приглашению В.В. Вернадского для работы в Комиссии по изучению естественных производительных сил России (КЕПС). В те годы это был энергичный молодой человек, страстно поглощенный научной деятельностью; в область интересов Бориса Личкова входили различные отрасли геологии и географии (тектоника, гидрогеология, четвертичная геология, палеонтология, стратиграфия) [5].

Уже в 1929 г. Б.Л. Личков начинает преподавать в Ленинградском университете, является старшим научным сотрудником в Геоморфологическом институте АН СССР (ныне – Институт географии РАН), заведует отделом подземных вод в Гидрогеологическом институте (1929–1934 гг.). Под его редакцией выходит четыре выпуска монографии «Исследования подземных вод СССР». Б.Л. Личков – выдающийся ученый, философ, специалист широкого профиля – был арестован по надуманному делу в январе 1934 г., осужден, сидел и лишь в 1956 г. был полностью реабилитирован.

В то же время, согласно приказу по геолого-почвенно-географическому факультету от 28 сентября 1936 г., на вновь образованной кафедре гидрогеологии начинают преподавательскую карьеру бывшие студенты Б.Л. Личкова, окончившие университет по специальности «гидрология подземных вод» (В.А. Сергеев, Н.Я. Верхало-Узкий и Е.А. Ансберг). Благодаря стараниям заведующего С.С. Кузнецова была создана хорошая материальная база кафедры — гидрогеологическая лаборатория, библиотека с обменным фондом, организован научный кружок.

Ничуть не умаляя заслуг Сергея Сергеевича Кузнецова в развитии гидрогеологии Ленинградского университета, все же следует подчеркнуть определяющую роль Бориса Леонидовича Личкова в становлении Ленинградской школы гидрогеологов и в значительных идейных вложениях в различные разделы науки о подземных водах. Огромный научный вклад Б.Л. Личкова очевиден, но был незаслуженно забыт по причине его ареста. Вернуться в Ленинград Б.Л. Личков смог лишь в 1945 г. После возвращения Борис Леонидович занимает должность заведующего кафедрой гидрогеологии, которой и заведует вплоть до 1965 г.



Рис. 1. Послевоенный коллектив кафедры гидрогеологии ЛГУ. Б.Л. Личков (заведующий кафедрой), Г.В. Короткевич, В.С. Самарина, М.И. Врублевский, В.А. Сергеев, Е.А. Ансберг, Ш.Ф. Бутс.

Борис Леонидович — основатель *научной школы* «О роли подземной гидросферы в истории Земли», заложившей фундамент школы гидрогеологов Ленинградского университета. Основные положения школы изложены в его монографиях: «К основам современной теории Земли» (1965 г.) и «Природные воды Земли и литосфера» (1960 г.), которые до сих пор не утратили своего значения.

Б.Л. Личковым создано новое астрогеологическое направление в геологии (уже в сороковые годы им была связана геология и астрономия). Работы по зонам рельефа земного шара и движению материков были предпосылкой его исследований по общей теории Земли и Научное наследие Бориса Леонидовича составляет опубликованных работ, в числе которых 12 монографий, учебник, курсы лекций, философские статьи, а также переписка с В.И. Вернадским с 1918 по 1944 г. Творческое наследие Б.Л. Личкова чрезвычайно велико и далеко не освоено (около 100 работ осталось неопубликованными). Многие из его идей и представлений прочно вошли в науку и пользуются широким признанием, составляя фундамент современной гидрогеологии. Существуют идеи и учения Б.Л. Личкова, которые не были восприняты научной общественностью и не получили общего признания; это объясняется, прежде всего, их несвоевременностью и ярко выраженной оригинальностью.

При Борисе Леонидовиче на кафедре появилась молодая талантливая молодежь (М.А. Мартынова, Г.И. Мартьянова, О.Н. Собакин, Э.В. Козлова, Е.В. Часовникова) [2]. В 1961 г. в НИИ земной коры, созданном при геологическом факультете ЛГУ в 1936 г., была организована лаборатория гидрогеологии, первым руководителем которой стал д.г.-м.н. А.Е. Ходьков. Это было время интенсивного развития гидрогеологии при тесном взаимодействии сотрудников лаборатории и кафедры.

Следующим заведующим кафедрой гидрогеологии стал А.К. Ларионов, который заведовал объединенными кафедрами гидрогеологии и инженерной геологии в течение двух лет, до 1967 г., когда усилиями Анатолия Константиновича обе кафедры смогли восстановить самостоятельный статус. С 1967 по 1969 г. исполняющим обязанности заведующего кафедрой гидрогеологии был М.И. Врублевский — специалист по минеральным водам.

С 1969 по 1984 г. заведование кафедрой принял на себя Г.В. Короткевич, он значительно расширил круг научных направлений кафедры, которые охватывали большой круг вопросов, относящихся к карсту, инженерной гидрогеологии, динамике подземных вод. При Г.В. Короткевиче возникло и окрепло гидрогеоэкологическое направление (связанное с рациональным использованием ресурсов гидроминерального сырья), изучались проблемы современного и древнего галогенеза, особенности образования и рационального освоения солеродных бассейнов. В центре научной деятельности Георгия Васильевича – соляной карст (механизмы выветривания и растворения каменной соли в естественных условиях).

В этот же период на кафедре работает группа В.С. Самариной, которая проводит региональные исследования в Таджикистане; результаты их работы вошли в монографию «Гидрогеология СССР» (том 41 «Таджикистан»). В этих работах участвовали многие специалисты кафедры, аспиранты и студенты. Со студенческой скамьи до 1982 г. жизнь В.С. Самариной была связана с кафедрой гидрогеологии, пока трагические обстоятельства не вынудили ее оставить университет.

В 1984 г. кафедру возглавил д.г.-м.н., профессор А.Н. Воронов, который руководил кафедрой четверть века вплоть до 2009 г. [6], когда его сменил П.К. Коносавский. За годы заведования А.Н. Воронов, обладая великолепным организаторским талантом, привлек на кафедру целый ряд первоклассных специалистов, создал при кафедре гидрогеологии новые лаборатории; на кафедре стали развиваться новые направления, такие как нефтегазовая гидрогеология, экология водных ресурсов, геохимия радиоактивных газов в подземных гидрогеологические проблемы волах. водный менеджмент, разработки полезных В 1997 г. была открыта лаборатория изотопов природных возглавляемая профессором Э.М. Прасоловым, в 2003 г. – лаборатория радиационного

контроля подземных вод, возглавляемая Е.П. Каюковой. Во все сложные времена при кафедре продолжала функционировать гидрохимическая лаборатория.

При А.Н. Воронове установилось тесное сотрудничество с гидрогеологами Польши, Ирландии, Италии, США, Южной Кореи, Франции, Египта и др. [7]. Силами кафедры гидрогеологии были проведены три международные конференции (1993, 1997, 2002 гг.) и симпозиум «Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы» (2007 г.). Именно Аркадием Николаевичем был задан вектор на международное сотрудничество кафедры гидрогеологии, и этот тренд удалось сохранить до настоящего времени стараниями его учеников: в настоящее время Н.А. Виноград является вице-президентом Международной ассоциации гидрогеологов (IAH).

Пожалуй, ни один из заведующих кафедрой не был так внимателен к подрастающему поколению, как Аркадий Николаевич, в его бытность на кафедре гидрогеологии было проведено более 10 конференций «Чистая вода» для школьников и студентов младших курсов. Многими участниками конференций был сделан выбор в пользу науки о подземных водах, многие пришли на кафедру, многие состоялись как первоклассные специалисты (А.М. Никуленко, С.В. Жданов и др.) [8, 9].

С 1990 по 2000 г. на кафедре гидрогеологии работал д.г.-м.н., профессор, член-корр. АН СССР В.А. Мироненко, который возглавлял Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН и Межфакультетский научный центр «Гидрогеоэкология» СПбГУ. В.А. Мироненко – крупный специалист в области гидрогеологии и инженерной геологии, им предложены оригинальные решения задач геофильтрации на основе численного моделирования, широко используемые в настоящее время. Его исследования нашли обобщения в монографии «Проблемы гидрогеоэкологии». После трагической смерти Валерия Александровича его место занял профессор кафедры д.г.-м.н. Вячеслав Гениевич Румынин.

В период заведования П.К. Коносавского (2009–2018 гг.) тематику научно-практических работ кафедры пополнили новые направления: горнопромышленная гидрогеология, методика математического (численного) моделирования в гидрогеодинамике и геомиграции, гидрогеологические изыскания при промышленном и гражданском строительстве. В сотрудничестве с НИЦ «Гидрогеология» и СПбО ИГЭ РАН проводился обширный комплекс совместных прикладных исследований, базирующихся на традиционных и инновационных наукоемких полевых и информационных технологиях.



Рис. 2. Коллектив кафедры гидрогеологии СПбГУ, 2010—2011 учебный год. *Слева направо*: А.А. Потапов, Р.А. Филин, Д.А. Другов, А.М. Никуленков, Е.П. Каюкова, Н.А. Виноград, А.В. Тудвачев, П.К. Коносавский, В.В. Тихомиров, С.В. Жданов, А.В. Ефремов, С.Э. Макашов, С.Н. Спицова, О.В. Кузьмицкая, А.В. Лучина, В.Г. Румынин.

Прошло совсем немного лет, и в процессе ряда реорганизаций Санкт-Петербургского государственного университета в 2014 г. был создан Институт наук о Земле, в состав которого вошли геологический факультет и факультет географии и геоэкологии, а также кафедра почвоведения биологического факультета. Изменения в системе образования СПбГУ привели к сокращениям преподавателей, увеличению нагрузки и жестким условиям контрактов, что сказывается на подготовке специалистов.

Кафедра и ее сотрудники сумели пережить 30-е годы, тяжелые военные испытания, восстановление после разрухи, распад Советского Союза... Однако по прошествии 90 лет, вместивших становление и расцвет науки о подземных водах в Санкт-Петербургском (Ленинградском) государственном университете, приходится констатировать, что кафедра гидрогеологии СПбГУ, к сожалению, в настоящее время переживает далеко не лучшие свои времена. Пока еще школа гидрогеологов ЛГУ (СПбГУ) сохраняется, но уже сейчас на кафедре числятся лишь шесть сотрудников, и только один на полной ставке (и полностью отсутствует перспективная молодежь!). С 2017 г. по настоящее время исполняющим обязанности заведующего кафедрой гидрогеологии СПбГУ является С.Б. Бурлуцкий.

Еще в 2007 г. участники симпозиума «Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы», который собрал лучших специалистов-гидрогеологов постсоветского пространства, обсуждали существующие на тот временной этап проблемы гидрогеологии, рассматривали вехи развития гидрогеологии после Первого гидрогеологического съезда. Было отмечено, что съезд 1931 г. стал определяющим для развития учения о подземных водах на многие десятилетия, именно проведение съезда способствовало оформлению гидрогеологии в самостоятельную науку.

На симпозиуме 2007 г. звучали предложения по подготовке Второго съезда, однако с тех пор прошло почти 15 лет... и 90 лет после Первого съезда!

Современные реалии таковы: в подготовке специалистов-гидрогеологов существуют серьезные проблемы. Недооценка важности подготовки квалифицированных кадров неминуемо отразится (и уже отражается) на уровне решения проблем водоснабжения и других гидрогеологических задач в нашей стране.

Казалось бы, гидрогеологи нужны стране, но ситуация с подготовкой гидрогеологов в вузах является далеко не благополучной. Возможно, Второй гидрогеологический съезд смог бы дать мощный толчок развитию науки и привлечь внимание к проблеме подготовки кадров.

При подготовке статьи использованы материалы Музея истории СПбГУ, Объединенного архива СПбГУ, Архива Российской академии наук.

## Список литературы

- 1. Богомолов и др. К организации Второго гидрогеологического съезда (СНГ) // Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы. СПб.: СПбГУ, ВВМ, 2008. С. 7–28.
- 2. Воронов А.Н. Гидрогеология наука о подземной гидросфере (алмаз чистой воды в ожерелье геологических наук) // Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы. СПб.: СПбГУ, ВВМ, 2008. С. 33–45.
- 3. Геологическая наука в Санкт-Петербургском университете / Ред. В.В. Куриленко, В.А. Прозоровский. Л.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2006. 160 с.
- 4. Геологический факультет (LXXV лет в очерках жизни и творчества преподавателей). Л.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2008. 360 с.
  - 5. Каюкова Е.П. Борис Леонидович Личков. СПб.: ВВМ, СПбГУ, 2013. 49 с.
- 6. Каюкова Е.П. Аркадий Николаевич Воронов (страницы биографии) //Памяти А.Н. Воронова. Сб. статей под ред. Е.П. Каюковой СПб.: ВВМ, 2018. С. 11–29.
- 7. Виноград Н.А. Международное сотрудничество на кафедре гидрогеологии // Памяти А.Н. Воронова. Сб. статей под ред. Е.П. Каюковой СПб.: ВВМ, 2018. С. 36–45.
- 8. Сумина Н.И., Виноград Н.А. Кафедра гидрогеологии и детские экологические экспедиции // Памяти А.Н. Воронова. Сб. статей под ред. Е.П. Каюковой. СПб.: ВВМ, 2018. С. 46–49.
- 9. Жданов С.В. Воспоминания школьника и студента // Памяти А.Н. Воронова. Сб. статей под ред. Е.П. Каюковой. СПб.: BBM, 2018. С. 61–63.

# РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ХАНТЫ-МАНСИЙСКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-68-72

**Курчиков А.Р.**<sup>1,2</sup>, Вашурина М.В.<sup>1,2</sup>, Козырев В.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, ARKurchikov@tmnsc.ru; <sup>2</sup> Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Kozyrev-v@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается ресурсный потенциал пресных подземных вод территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Показано распределение естественных ресурсов по площади рассматриваемой территории. Сообщается о достаточной обеспеченности территории ХМАО-Югра естественными ресурсами пресных подземных вод (обеспеченность прогнозными эксплуатационными ресурсами подземных вод на 1 человека 66.86 м³/сут, по УрФО – 14.2 м³/сут). Отмечается, что за двадцатилетний период водно-хозяйственная обстановка в регионе существенно изменилась, накоплен большой фактический материал, который позволяет уточнить и, возможно, пересмотреть ранее полученные результаты.

Ключевые слова: ресурсы, пресные подземные воды, региональные исследования, обеспеченность.

**Abstract.** The paper considers the resource potential of fresh groundwater in the territory of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - The distribution of natural resources over the area of the considered territory is shown. It is reported that the territory of Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra is sufficiently supplied with natural resources of fresh groundwater (the availability of predicted operational groundwater resources per person is  $66.86 \, \text{m}^3 \, / \, \text{day}$ , in the Ural Federal District it is  $14.2 \, \text{m}^3 \, / \, \text{day}$ ). It is noted that over a twenty-year period, the water-economic situation in the region has changed significantly, a large amount of factual material has been accumulated, which makes it possible to clarify and possibly revise the previously obtained results.

Key words: resources, fresh groundwater, regional research, security.

Пресные подземные воды (ППВ) на территории XMAO – Югры широко используются в целях питьевого водоснабжения населения и технического обеспечения объектов промышленности, в том числе систем поддержания пластового давления (ППД) нефтяных месторождений. Перспектива использования ППВ определяется главным образом величиной их ресурсного потенциала, а также соответствием качества подземных вод требованиям по целевому назначению.

Систематическое изучение геолого-гидрогеологических условий района исследований началось в 60-80-е годы прошлого столетия и было связано с поисками нефти, газа и необходимостью хозяйственного освоения территории.

Масштабные региональные исследования по оценке естественных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод Западно-Сибирского мегабассейна (ЗСМБ) проведены Западно-Сибирским научно-исследовательским геологоразведочным нефтяным институтом (ЗапСибНИГНИ) в 1966–1968 гг. и Тюменской комплексной геологоразведочной экспедицией (ТКГРЭ) совместно с Тюменским индустриальным институтом в 1983 г. Работы выполнялись под руководством Ю.К. Смоленцева. Исследованиями была охвачена большая площадь Тюменской (в том числе Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов), Томской, Омской и Новосибирской областей. Результатом выполненных исследований являлась систематизация и обобщение фактического материала по гидрогеологическим условиям исследуемой территории, составление геоморфологических, гидрогеологических, геологических, гидродинамических водоносных горизонтов. Инновационной при этом стала выполненная схематизация гидрогеологической стратификации и общего районирования, отражающая основные закономерности формирования пресных подземных вод, в основу которой положены бассейны стока – природные гидрогеологические районы с единым циклом формирования подземных вод.

Оценка прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод (ПЭРПВ) проведена для существующих и потенциальных потребителей на площади 330 тыс. км² аналитическим методом (Ю.К. Смоленцев). Это было сделано впервые на рассматриваемой территории по

результатам обширных полевых исследований и сбора существующей информации. ПЭРПВ оценивались по величине питания напорных вод в естественных условиях, которая определялась по норме минимального среднемесячного зимнего речного стока. Общие эксплуатационные ресурсы подземных вод (плиоцен-четвертичного и олигоценового комплексов) подсчитаны в количестве 62.2 млн м<sup>3</sup>/сут.

В 1993 г. территория Ханты-Мансийского автономного округа — Югры (ХМАО — Югра) получила статус субъекта Российской Федерации. В соответствии с территориальным разделением произошло и разделение хозяйственной деятельности, в том числе разделение гидрогеологических исследований по территориям субъектов РФ.

В 1998–2001 гг. ЗАО «ГИДЭК» выполнены работы по оценке обеспеченности населения ХМАО ресурсами подземных вод для питьевого водоснабжения. В результате обобщения обширного количества данных изучения гидрогеологических условий территории, опыта разведки и эксплуатации пресных подземных вод на площади ХМАО составлены геологические карты доплиоценовых и плиоценовых отложений с серией разрезов, карты эффективных мощностей отложений атлымской и новомихайловской свит, карты общей и эффективной мощности плиоцен-четвертичных отложений, а также карта обеспеченности населения ХМАО ресурсами подземных вод, пригодными для питьевого использования (отчет НППФ «ГИДЭК», Палкин С.С. и др., 2001 г.).

Вышеуказанная оценка ПЭРПВ выполнена на основе обобщения данных изучения гидрогеологических условий территории, опыта разведки и эксплуатации пресных подземных вод на площади ХМАО 534.8 тыс. км² (С.С. Палкин) методом численного моделирования. Геологический разрез территории округа для целей моделирования схематизировался пятью расчетными слоями. При подсчете ПЭРПВ многолетняя сработка емкостных запасов не учитывалась, в качестве источников формирования эксплуатационных ресурсов принималось только питание водоносного комплекса и привлекаемые ресурсы. Общая величина ПЭРПВ составила 107.79 млн м³/сут.

В рамках реализации целевой программы «Чистая вода» по поручению правительства ХМАО – Югры ЗСФ ИНГГ СО РАН в 2013–2014 гг. выполнена региональная работа «Гидрогеологические исследования с целью оценки современного состояния перспективного использования подземных вод питьевого водоснабжения XMAO – Югры» (отчет ЗСФ ИНГГ СО РАН, Вашурина М.В. и др., 2013-2014 г.) [1, 3]. Гидрогеологические исследования осуществлены в границах 65 муниципальных образований ХМАО – Югры, на территории более 110 населенных пунктов. Уточнены геолого-гидрогеологические условия исследуемой территории, изучен химический состав подземных вод, и оценено качество добываемых и используемых в питьевых целях вод. Изучены существующие системы водоподготовки и обоснованы современные технологии применения эффективной очистки пресных подземных вод перед их использованием в питьевых целях. Выполнена оценка состояния ресурсного потенциала пресных подземных вод на объектах исследования и соответствия эксплуатации водозаборов подземных вод существующему законодательству РФ. Разработаны рекомендации по совершенствованию существующей системы питьевого водоснабжения и организации недропользования с целью обеспечения исследуемых объектов кондиционными подземными водами питьевого назначения. Полученная в процессе исследований информация систематизирована в табличных приложениях (реестры водозаборных скважин по объектам исследования, каталоги результатов гидрохимического опробования ППВ до и после очистки) и наглядно отражена на картах фактического материала, карте современного состояния и использования ППВ на территории ХМАО – Югры и тематических гидрогеохимических картах (карты кондиционности пресных подземных вод по обобщенным, органолептическим и санитарно-токсическим показателям на территории ХМАО – Югры, карта степени эффективности очистки пресных подземных вод до норм питьевого стандарта на территории ХМАО – Югры).

Территория XMAO – Югры располагается в центральной части Западно-Сибирской равнины, в гидрогеологическом отношении относится к Западно-Сибирскому мегабассейну подземных вод [1, 2, 4].

Хозяйственная ценность водно-ресурсного потенциала региона тем выше, чем значительнее доля «устойчивой» подземной составляющей стока, величина которой количественно определяется модулем подземного стока. Подземный сток зоны свободного водообмена в районах с постоянно действующей гидрографической сетью формируется под дренирующим воздействием речных систем.

Суммарный модуль подземного стока на территории ХМАО – Югры, как отмечено выш, колеблется в широких пределах – от 0.04 до 5.15 л/с $\times$ км<sup>2</sup>, однако преобладают значения от 0.2 до  $1.0 \text{ л/c} \times \text{км}^2$  (отчет ЗапСибНИГНИ, Смоленцев Ю.К. и др., 1983 г.). Модуль подземного стока неоген-четвертичных отложений изменяется значительно – от 0.01 до 2.00 л/с×км<sup>2</sup> и более. Максимальные значения характерны для участков со значительной расчлененностью рельефа или с высокой водопроводимостью отложений (Обь-Кондинское междуречье, Белогородский материк, бассейны рек Балык, Юган, Вах и др.). Пониженные значения модуля  $(0.1-0.5 \text{ л/c} \times \text{кm}^2)$  наблюдаются в центральной слаборасчлененной части Обь-Иртышского междуречья. Модуль подземного стока основного водоносного атлымновомихайловского комплекса изменяется от 0.01 до 1.04 л/с×км<sup>2</sup>. Наибольшие его значения (до  $1 \text{ л/c} \times \text{км}^2$ ) наблюдаются на крайнем юго-западе рассматриваемой территории (западная часть Кондинского муниципального района) в связи с неглубоким залеганием комплекса и высокой расчлененностью рельефа. В центральной части значения модуля изменяются несущественно – от 0.16 до 0.28 л/с $\times$ км $^2$  в связи с тем, что комплекс залегает на значительной глубине и перекрыт слабопроницаемой толщей верхнего олигоцена. Минимальные значения (до  $0.1 \text{ л/c} \times \text{км}^2$ ) картируются на наиболее заболоченных междуречных пространствах (Кондинский, южная часть Ханты-Мансийского, Советский, Березовский муниципальные районы). Модуль подземного стока верхнеэоценнижнеолигоценовых отложений не превышает 0.05 л/с × км², что обусловлено значительной глубиной залегания кровли, частой литолого-фациальной изменчивостью и низкими фильтрационными свойствами отложений.

Первый гидрогеологический комплекс (эоцен-четвертичные отложения) кайнозойского гидрогеологического бассейна характеризуется свободным, а в нижних частях затрудненным водообменом, и в его пределах большей частью развиты пресные воды.

Подземные воды в пределах территории исследований принадлежат к южной группе бассейнов, а именно к системе Среднеобского бассейна регионального подземного стока [5, 6].

По условиям формирования и динамике подземного стока в разрезе Среднеобского бассейна В.Т. Цацульниковым [4] выделены две подзоны. Подзона местного стока охватывает преимущественно четвертичные отложения и характеризуется сроком возобновления ресурсов менее 0.1 млн лет. Часть разреза, сложенная олигоценовыми отложениями, отнесена к подзоне регионального стока, где срок возобновления ресурсов составляет 1.2—5.6 млн лет.

Общие естественные ресурсы основных водоносных горизонтов в пределах Среднеобского бассейна стока оценены в 255 м³/с, около 70 % из них формируется в четвертичных отложениях (отчет ЗапСибНИГНИ, Смоленцев Ю.К. и др., 1983 г.). Ресурсы олигоценового — четвертичного водоносного комплекса формируются из ресурсов безнапорных вод четвертичных и неогеновых образований и ресурсов напорных вод олигоценовых отложений. Формирование ресурсов безнапорных вод происходит преимущественно за счет осущения пласта и инфильтрации атмосферных осадков, при этом восполняемая часть составляет около половины объема эксплуатационных ресурсов. Ресурсы напорных вод образуются в основном за счет перетекания из вышележащих водоносных горизонтов и сработки естественных емкостных запасов горизонта, при этом на восполняемую часть ресурсов приходится примерно 20–25 %.

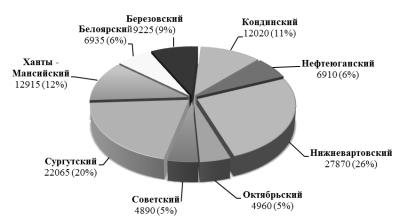
## Прогнозные эксплуатационные ресурсы подземных вод и их распределение по площади

Возможный суммарный отбор подземных вод в пределах того или иного региона (гидрогеологического района — бассейна подземных вод, речного бассейна, административного района) при заданных гидрогеологических, природоохранных и других ограничениях характеризуется как ресурсный потенциал подземных вод либо как ПЭРПВ. Эта величина расхода отражает потенциальные возможности использования подземных вод и подсчитывается по величине площадного или линейного модуля ПЭРПВ.

В целом, ХМАО – Югра располагает значительным ресурсным потенциалом ППВ. Общая величина ПЭРПВ в соответствии с последней работой по «Оценке обеспеченности населения ХМАО…» (отчет НППФ «ГИДЭК», Палкин С.С. и др., 2001 г.) составляет 107.79 млн м³/сут. Для сравнения ЯНАО – 35.38 млн м³/сут, юг Тюменской области – 6.01 млн м³/сут (отчет ОАО «СибНАЦ», Соколова А.В. и др., 2001 г.).

Распределение прогнозных эксплуатационных ресурсов ПВ по территории ХМАО – Югры неравномерно. Наибольшая часть прогнозных ресурсов сосредоточена на территории Нижневартовского (25.86 %) и Сургутского (20.47 %) муниципальных районов, наименьшая – на территории Советского муниципального района (рисунок).

При среднем значении модуля ресурсного потенциала подземных вод  $2.35 \text{ л/c} \times \text{кm}^2$  его величина по округу изменяется от  $1.22 \text{ л/c} \times \text{кm}^2$  (Березовский район) до  $3.18 \text{ л/c} \times \text{кm}^2$  (Нефтеюганский район). Наиболее существенные различия отмечаются на территориях крайних западных и восточных районов округа.



Распределение прогнозных ресурсов подземных вод по административным районам XMAO – Югры.

Таким образом, вся характеризуемая территория является надежно обеспеченной ресурсами пресных подземных вод. Это означает, что все потребители (в том числе и крупные) могут быть обеспечены в достаточном количестве ресурсами подземных вод, формирующимися на территории округа.

Резюмируя вышеизложенное, следует отметить, что обеспеченность территории XMAO — Югры естественными ресурсами пресных подземных вод достаточная (обеспеченность ПРППВ на 1 человека 66.86 м<sup>3</sup>/сут, по УрФО — 14.2 м<sup>3</sup>/сут).

Однако с момента выполнения региональных работ по оценке прогнозных эксплуатационных ресурсов подземных вод по территории XMAO прошло более 20 лет. Степень сопоставимости результатов оценок (Смоленцев Ю.К. и Палкин С.С.) высокая, несмотря на разный методический подход.

Если пересчитать величину ПЭРПВ 107.79 млн  $m^3$ /сут (Палкин С.С.) пропорционально площади первой оценки 330 тыс.  $\kappa m^2$ , то получим 66.5 млн  $m^3$ /сут. Сравнив данное значение с ранее полученным, можно сделать вывод о хорошей сходимости. Меньшее значение (62.2 млн  $m^3$ /сут), полученное по результатам первой оценки ПЭРПВ, чем второй (66.5 млн  $m^3$ /сут), говорит о том, что расчеты были выполнены для более «жестких условий» и поэтому данный прогноз является более осторожным. Сопоставительный анализ

показывает, что достоверность ранее проведенной оценки ПЭРПВ достаточно высокая. Преимуществом ее является «осторожность» прогноза и то, что при расчетах учитывались естественные условия.

С момента последней оценки ПЭРПВ водно-хозяйственная обстановка в регионе существенно изменилась, накоплен большой фактический материал, который позволил уточнить и, возможно, пересмотреть ранее полученные результаты. Фактический материал накоплен в результате выполнения работ по переоценке запасов пресных подземных вод, которая проведена на территории 11 населенных пунктов округа из 24 с населением, превышающим 10000 человек. По восьми населенным пунктам выполнен подсчет запасов. Оценочные и переоценочные работы реализованы и на многочисленных ведомственных водозаборах. Проведены работы по площадной оценке прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов пресных подземных вод по району г. Пыть-Ях и по району г. Нефтеюганска. Выполненные работы в этот период, как правило, имели местный характер, отвечали району, населенному пункту и ведомственному водозабору. В связи с этим назрела необходимость уточнения ресурсной базы пресных подземных вод и их использования в целом по территории округа. Следует отметить, что подобная ситуация сложилась и по всей Западной Сибири, поэтому аналогичные работы нужно выполнить по всей территории Тюменской области.

Кроме этого, результаты выполненных исследований, проведенных в рамках работы «Гидрогеологические исследования с целью оценки современного состояния и перспективного использования подземных вод питьевого водоснабжения ХМАО – Югры», выявили проблемы водоснабжения населения округа питьевой водой.

Для обеспечения населения округа качественной питьевой водой в условиях интенсивного нефтегазового освоения необходимо проведение комплекса мероприятий (рекомендаций), представляющих собой систему правовых, организационных и технических мер, направленных на улучшение сложившейся в настоящее время ситуации путем предотвращения и устранения загрязнения подземных вод. За исполнением мероприятий должен осуществляться контроль со стороны органов власти различного уровня.

Реализация мероприятий позволит, прежде всего, защитить водные ресурсы от загрязнения, будет способствовать повышению надежности системы водоснабжения. Как следствие, это позволит обеспечить население безопасной водой нормативного качества в соответствии с существующими нормами водопотребления, что является приоритетной социальной проблемой, решение которой необходимо для сохранения здоровья, повышения уровня жизни и улучшения условий деятельности населения.

- 1. Курчиков А.Р., Вашурина М.В., Козырев В.И. Пути решения государственной программы «Чистая вода» (на примере Ханты-Мансийского автономного округа) // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России (XXI совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.Н. Мельникова СО РАН, 2015. С. 44–49.
- 2. Кусковский В.С., Охалин С.Н., Смоленцев Ю.К. и др. Гидро- и инженерно-геологические условия юго-запада Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1987. 129 с.
- 3. Смоленцев Ю.К., Кусковский В.С. Особенности формирования подземных вод зоны гипергенеза Западно-Сибирской плиты // Труды института геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР. Вып. 683. Подземные воды юга Западной Сибири (формирование и проблемы рационального использования). Новосибирск: Наука, 1987. С. 3–65.
- 4. Цацульников В.Т. Районирование по условиям формирования эксплуатационных ресурсов пресных подземных вод (на примере Среднеобского бассейна стока) // Тезисы докладов Всесоюзного совещания по подземным водам востока России. Иркутск Чита, 1985. С. 68–69.
- 5. Матусевич В.М. Гидрогеологические бассейны Западно-Сибирской равнины // Материалы Международного геологического конгресса. 27 сессия, т. IX, часть 2. М.: Наука, 1984. С. 3–7.
- 6. Матусевич В.М., Смоленцев Ю.К. Гидрогеологические структуры Западно-Сибирской плиты // Пресные и маломинерализованные подземные воды Западной Сибири. Межвузовский сборник научных трудов. Тюмень, 1989. С. 4–17.

# МИНЕРАЛЬНЫЕ ЛЕЧЕБНЫЕ ТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДЫ БАРГУЗИНСКОЙ ВПАДИНЫ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-73-77

Кустов Ю.И.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, irig@crust.irk.ru

Аннотация. Известные источники (очаги разгрузки) термальных вод в пределах Баргузинской впадины, как группа минеральных вод, по своему составу являются аналогами четырех типов минеральных лечебных вод: уш-бельдирского, горячинского, аллинского и тункинского. На представленной карте все проявления минеральных вод — термальные азотные, кроме одного, вскрытого скважиной в отложениях осадочного чехла впадины, где термальная вода по газовому составу метановая. Углекислых вод во впадине нет. Выявленные источники минеральных вод используются для лечебных целей в местных водолечебницах, обогрева теплиц и отопления жилых помещений. Следует обратить внимание на бережное отношение к использованию ресурсов минеральных вод и сохранение экологических условий курорта.

Ключевые слова: минеральные воды лечебные, термальные, экология.

Abstract. The well-known sources (centers of discharge) of thermal waters within the Barguzin depression, as a group of mineral waters, are analogous in their composition to four types of mineral medicinal waters: Ush-Beldirsky, Goryachinsky, Allinsky and Tunkinsky. On the presented map, all manifestations of mineral waters are thermal, nitrogenous, except for one water show, which was opened by a well in the sedimentary cover of the depression, where the thermal water is methane in gas composition. There is no carbonic water in the depression. The identified springs of mineral waters are used for medicinal purposes in local hydrotherapy centers, heating greenhouses and heating living quarters. Attention should be paid to the careful attitude to the use of mineral water resources and the preservation of the ecological conditions of the resort.

Key words: mineral waters medicinal, thermal, ecology.

Баргузинская межгорная впадина — компенсированная впадина в границах зоны влияния Байкальского рифта, как геологическая структура представлена сложным асимметричным грабеном, сформированным в кайнозое. На северо-западе впадина ограничена отрогами Баргузинского хребта, а на юго-востоке — Икатским сводовым поднятием. От Байкальской некомпенсированной рифтовой впадины Баргузинская впадина отделена на юго-западе межвпадинной перемычкой, сложенной кристаллическими породами архей-протерозойского возраста.

Баргузинский хребет имеет монолитное глыбовое строение. Его формирование произошло в процессе раскола донеогеновой структуры Ангаро-Витимского поднятия. Рельеф хребта представлен эрозионно-тектоническими формами, а в его осевой части они приобретают альпинотипный облик. Относительные превышения вершин над днищами долин достигают 1200–1500 м.

Граница кристаллических пород протерозойского и палеозойского возраста Баргузинского хребта с рыхлыми отложениями неоген-четвертичного возраста впадины проводится по Баргузинскому разлому, осложненному кулисообразно расположенными разрывами. Контакт рыхлых осадочных пород впадины с кристаллическими породами Икатского хребта является плавным, но в ряде мест приграничной зоны впадины выявлены тектонические разломы с элементами сброса. Явно выраженного структурного шва тут нет, а упомянутые разломы разобщены и ориентированы под острыми углами к продольной оси впадины, осложняя ее общую конфигурацию [1].

Окруженная горными хребтами с абсолютными отметками 2840 м (Баргузинский) и 2476 м (Икатский) поверхность впадины фиксируется на абсолютных отметках от 456 м до 800 м. При длине 200 км и ширине 30–40 км Баргузинская впадина имеет плоский с эрозионно-аккумулятивными формами рельеф. Во внутреннем поле отмечены крупные песчаные массивы — «куйтуны», приподнятые на 100–150 м над днищем впадины. Предполагается, что это переработанный материал водно-ледниковых отложений, сохранившихся на приподнятых блоках фундамента. Эти блоки тяготеют к предгорью Баргузинского хребта. В этом же направлении смещена и продольная ось самой впадины (есть участки, где амплитуда опускания достигает 1.5–2.5 км).

Фундамент Баргузинской впадины представлен кристаллическими породами протерозойского возраста, а чехол — кластогенными слабодиагенезированными осадочными отложениями кайнозойского возраста. Состав пород фундамента представлен гранитами, а по материалам скважины, пробуренной южнее с. Могойто на глубине 1402 м, установлено наличие биотитовых и биотит-пироксен-амфиболитовых гнейсов [1].

В разрезе осадочных отложений кайнозойского чехла впадины выделяются три свиты. Нижняя представлена каолиновыми и диатомовыми глинами, алевролитами с прослоями углей, песка, песчаников, реже — гравелитов; свита получила название «угленосной». Возраст ее миоценовый. Мощность свиты в Аргодинском прогибе достигает 600–700 м.

Средняя свита представлена плохо отсортированными песками с примесью гальки и гравия, вплоть до галечников; редко встречаются алевролиты и глины, почти отсутствует органогенный материал. Для отложений свиты характерно проявление гидроокислов железа в виде пятен, стяжений и конкреций лимонита. Возраст отложений верхнеплиоценпостплиоценовый.

Отложения верхней свиты по литологическому составу идентичны отложениям подстилающей свиты, но в них нет скоплений лимонита. Пески с примесью гравия, галечников и валунов иногда содержат глинистые прослои. Возраст отложений плейстоценовый.

В средней части Баргузинской впадины выявлены острова многолетнемерзлых пород, вскрытых скважинами на глубине от 4 до 110 м, мощностью от 2 до 65 м. Севернее линии Курумкан-Аргода породы, полностью скованные льдом, вскрываются повсеместно на глубине от 40 до 50 м, а нижняя граница таких пород отмечается на глубинах от 150 до 300 м. Мощность сплошного слоя многолетнемерзлых пород может достигать 185 м [2].

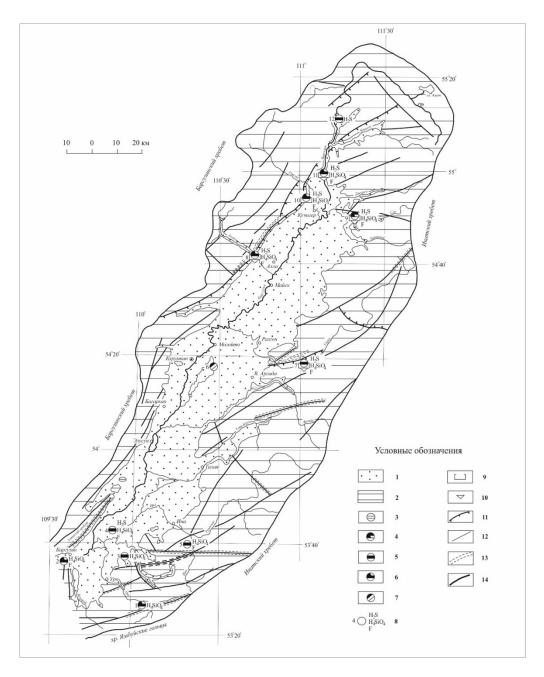
В пределах Баргузинской впадины климат резко континентальный с суровой зимой и коротким летом. Температура воздуха в январе –32...–30 °C (абс. максимум –53 °C, средний минимум –31 °C) и в июле +18...+20 °C. Для района впадины характерны: высокий коэффициент солнечной радиации, проявление циклона с северо-запада на юго-восток, устойчивое высокое давление, удаленность и защищенность территории от влияния океанов, значительная высота над уровнем моря, сложный рельеф с абсолютными отметками хребтов (около 3000 м). Суровая, безветренная и малоснежная зима сменяется поздней, ветреной и сухой весной с ночными заморозками, удерживающимися до конца первой декады июня. Среднегодовая температура воздуха –4...–5 °C.

Максимальное количество осадков составляет 260–320 мм. Наименьшая среднегодовая сумма осадков отмечена в районе с. Курумкан и составляет 200-300 мм. Основное количество осадков (80–85 % от годовой суммы) выпадает в теплое время года. В период с июля по август выпадает осадков более 50 % от суммы годовых и часто в виде ливневых дождей, которые иногда вызывают паводки на реках.

Река Баргузин — главная водная артерия в пределах Баргузинской впадины, имеет среднегодовой расход по многолетним данным 127 м $^3$ /с. Максимальный расход отмечен 27.07.1947 г. в объеме 751 м $^3$ /с, а минимальный — 18 м $^3$ /с 19.03.1957 г. Средний модуль стока р. Баргузин — 6.4 л/с·км $^2$  — это при общей площади ее водосбора до 19800 км $^2$ . Длина реки 416 км.

На фоне приведенных кратких сведений о природных условиях Баргузинской впадины особый интерес представляют источники минеральных лечебных термальных вод. В пределах впадины выявлены и изучены минеральные воды 12 проявлений. На трех источниках (т.т. 2, 3, 4) пробурено по одной скважине, которыми вскрыты воды подобного состава, что и в источнике, но температура этих вод несколько выше (рисунок).

По принятой схеме классификации природные воды делятся на пресные и минеральные. Пресные воды являются основным природным полезным ископаемым, используемым для питьевого и хозяйственного водоснабжения. Минеральные воды, в том числе и подземные, отличаются от пресных вод повышенной величиной минерализации,



Карта подземных минеральных лечебных термальных вод Баргузинской рифтовой впадины (составил Кустов Ю.И., 2006). I – терригенные (осадочные) отложения чехла впадины; 2 – кристаллические (метаморфические и изверженные) породы горно-складчатого обрамления; 3 – источник (скважина) термальных вод, положение линий в знаке: горизонтальные – воды азотные, наклонные – воды метановые; секторы в знаке: верхний – воды гидрокарбонатные, средний - сульфатные, нижний - хлоридные (неполная заливка сектора соответствует содержанию аниона от 20 до 50 %-экв); 4 – воды азотные сульфатно-гидрокарбонатные ушбельдирского типа; 5 – воды азотные сульфатные горячинского типа; 6 – воды азотные гидрокарбонатно-сульфатные аллинского типа; 7 – воды метановые гидрокарбонатные тункинского типа; 8 - y знака слева - номер водопункта на карте (в таблице), справа специфического компонента, определяющего бальнеологические минеральной воды; 9 – водолечебница бальнеологическая; 10 – термальная вода водопункта, используемая для обогрева жилых помещений и теплиц для выращивания овощей; 11 линия тектонического контакта с указанием направления смещения; 12 – линия установленного тектонического контакта; 13 – зона катаклаза и милонитизации; 14 – граница водосборной площади бассейна р. Баргузин.

обычно превышающей 1 г/дм<sup>3</sup>, насыщенностью их разнообразными газовыми компонентами, наличием в ионно-солевом составе специфических микрокомпонентов (бальнеологически активных или промышленно ценных) либо высокой температурой, превышающей 20 °C. На лечебные свойства минеральных вод определенный отпечаток накладывает наличие в их составе органического углерода ( $C_{\text{орг.}}$ ) и реакция среды (кислотность, щелочность).

В связи с этим минеральные воды, используемые для лечения и профилактики различных заболеваний организма человека, названы лечебными; используемые для извлечения из них ценных компонентов и солей — промышленными. Минеральные воды, нагретые за счет тепла земных недр в температурном интервале от 20 до 35 °C — это термальные воды (используются для лечебных процедур), нагретые до 100 °C — воды геотермальные (тепло этих вод используется для лечебных процедур и обогрева теплиц, зданий, сооружений), а воды с температурой выше 100 °C — воды термоэнергетические (используются для выработки электроэнергии и горячего пара). В свою очередь, минеральные лечебные воды по условиям использования подразделяются на питьевые и купальные. Некоторые лечебные купальные воды могут использоваться как для наружного применения (ванные процедуры), так и в качестве лечебных питьевых вод для приема внутрь.

Названия минеральных вод и выделение их типов определяются наличием в газовом и ионно-солевом составе бальнеологически активных компонентов, нормы которых установлены регламентирующими документами [3].

На схеме гидроминерального районирования территория Баргузинской впадины принадлежит Байкальской гидроминеральной области азотных и метановых термальных вод [4]. Азотные термальные воды выводятся на поверхность источниками по периферии впадины в местах сопряжения терригенно-осадочных пород впадины с кристаллическими породами горно-складчатого обрамления, и только Быстринский источник (т. 4) проявился в центральной части впадины. Метановые термальные воды вскрыты нефтегазопоисковой Баргузинской скважиной 1-р, пробуренной в 1954 г. в 9 км южнее пос. Могойто, на глубине 1192 м в отложениях осадочного чехла впадины. Углекислые воды в пределах впадины не выявлены.

Бальнеологические компоненты в минеральных водах источников, иногда в высоких концентрациях, представлены кремнекислотой, фтором и сероводородом. Радон в небольшом количестве установлен в водах только двух источников — Гаргинском и Аллинском. Сочетание газового, ионно-солевого состава и микрокомпонентов изученных вод источников дает право считать термальные воды источников Баргузинской впадины минеральными лечебными.

По материалам выполненных исследований и опубликованных литературных данных в недрах Баргузинской впадины выделены минеральные лечебные и термальные воды четырех типов (таблица). Минеральные воды этих типов используются местными бальнеологическими водолечебницами на источниках: Умхейском, Сеюйском, Аллинском, Гаргинском и Уринском [5]. На водолечебнице «Гарга» кроме бальнеолечения организован обогрев жилых помещений за счет ресурсов источника термальных вод. В ряде случаях около источников термальных вод сооружаются теплицы с обогревом энергией геотермальных вод этих источников для выращивания овощей.

Несмотря на суровый климат в пределах Баргузинской впадины, в водолечебницах прием и обслуживание пациентов лечебными процедурами ведутся круглогодично. В этом случае необходимо учитывать посещение водолечебниц и источников термальных вод туристами для отдыха и познавательных целей. При этом следует особое внимание обратить на режим и экологические условия эксплуатации курортных ресурсов каждого проявления термальных вод, регулируя прием пациентов для лечения и количество туристов, посещающих эти уникальные объекты природы.

Бальнеологические ресурсы минеральных лечебных термальных вод Баргузинской впадины следует использовать в режиме сохранения их для будущих поколений.

Минеральные воды Баргузинской впадины

		1	виве воды варт узинеког			
№ на	<u>Водопункт</u>	Г				
карте	дата обследования, исследователь	Сумма ионов	Ионно-солевой состав	Терапевтический компонент	Тип воды	
9	Сеюйский ист. 08.09.1989 г., Кустов Ю.И.	445.0	HCO <sub>3</sub> 41SO <sub>4</sub> 34F14Cl11 Na94Ca5K1	pH-8.2; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -133; F-12; H <sub>2</sub> S-11.2; t-47 °C; Rn-4 эман	Уш- бельдирский	
3	<u>Алгинский ист.</u> 03.09.1989 г., Кустов Ю.И.	706.0	SO <sub>4</sub> 82HCO₃11Cl6F1 Na65Ca31Mg2K2	pH-7.6; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -95.5; F-2.1; t-20.5 °C		
5	<u>Инский ист.</u> 1966 г., Гусев В.Н.	982.0	SO <sub>4</sub> 80HCO <sub>3</sub> 9Cl8F3 Na81Ca19	pH-7; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -40; F-10; t-20.5 °C		
7	<u>Гаргинский ист.</u> 05.09.1989 г., Кустов Ю.И.	1140.0	SO <sub>4</sub> 72HCO <sub>3</sub> 14Cl12F2 Na88Ca10K2	pH-7.9; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -133; F-6.9; H <sub>2</sub> S-2.4; t-73.5 °C; Rn-30 эман	Горячинский	
12	Мегдылконский ист., 20.12.1967 г., Иванов А.Е.	550.0	$\frac{SO_{4}59HCO_{3}22Cl19}{(Na+K)72Ca27Mg1}$	pH-7.3; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -80; F-1.6; t-34.5 °C		
4	Быстринский ист. 04.09.1989 г., Кустов Ю.И.	704.0	SO <sub>4</sub> 60Cl18HCO <sub>3</sub> 16F6 Na95Ca4Mg1	pH-7.15; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -100; F-10; H <sub>2</sub> S-4.4; t-26.5 °C		
1	<u>Уринский ист.</u> 1966 г., Гусев В.Н.	382.5	$\frac{SO_452HCO_334Cl12F2}{(Na+K)97Ca3}$	pH-7.5; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -110; F-2; H <sub>2</sub> S-1.5; t-67 °C		
2	Толстихинский ист., 08.04.1966 г., Замана Л.В.	473.0	$\frac{SO_445HCO_341Cl10F4}{(Na+K)98Ca1Mg1}$	pH-7.9; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -27; F-5; t-42 °C		
8	<u>Аллинский ист.</u> 06.09.1989 г., Кустов Ю.И.	359.8	SO <sub>4</sub> 45HCO <sub>3</sub> 37F9Cl9 Na93Ca6K1	pH-9.0; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -160; F-8.8; H <sub>2</sub> S-19.4; t-72 °C; Rn-20 эман	Аллинский	
10	Кучигерский ист. 06.09.1989 г., Кустов Ю.И.	347.0	SO <sub>4</sub> 49HCO <sub>3</sub> 31F11Cl9 Na87K10Ca3	pH-10.1; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -160; F-10; H <sub>2</sub> S-13.4; t-44.5 °C		
11	Умхейский ист. 07.09.1989 г., Кустов Ю.И.	439.0	SO <sub>4</sub> 46HCO <sub>3</sub> 33F13Cl8 Na94Ca5K1	pH-8.9; H <sub>2</sub> S-16.7; F-11.2; H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> -148.1; t-46 °C		
6	Баргузинская скв. 1-р; 1954 г., Конева В.И.	475.0	$\frac{HCO_{3}83Cl11SO_{4}6}{(Na+K)72Ca17Mg11}$	pH-8.4; t-29 °C	Тункинский	

- 1. Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 258 с.
- 2. Колдышева Р.Я. Многолетнемёрзлые породы. Гидрогеология СССР. Т. XXII Бурятская АССР. М. Изд-во «Недра», 1970. С. 67–88.
- 3. Классификация минеральных вод и лечебных грязей для целей их сертификации. Методические указания № 2000/34. М: Российский НЦ восстановительной медицины и курортологии, 2004. 75 с.
- 4. Ломоносов И.С., Кустов Ю.И., Пиннекер Е.В. Минеральные воды Прибайкалья. Иркутск: Вост.-Сиб. книжное изд-во, 1977. 224 с.
- 5. Борисенко И.М., Замана Л.В. Минеральные воды Бурятской АССР. Улан-Удэ: Бурятское книжн. издво, 1978. 162 с.

# ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О СОСТАВЕ МИКРОФЛОРЫ ПРИРОДНЫХ ВОД НАРЫКСКО-ОСТАШКИНСКОЙ ПЛОЩАДИ (КУЗБАСС)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-78-82

Лепокурова О.Е. $^{1,2}$ , Домрочева Е.В. $^1$ , Наливайко Н.Г. $^2$ 

<sup>1</sup>Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Томск, LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru, DrebotVV@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

**Аннотация.** В статье впервые приведены данные о микрофлоре озерных, речных и подземных вод, в том числе вод угольных отложений территории добычи угольного метана. Охарактеризованы закономерности распределения и некоторые зависимости содержания микрофлоры от состава вод.

Ключевые слова: воды угольных отложений, микрофлора, Кузбасс.

**Abstract**. For the first time, the article presented data on the microbial flora of lacustrine, river and ground waters, including the waters of coal deposits in the territory of coal bed methane mining. Regularities of distribution and some dependences of microbial flora on water composition were obtained.

Key words: waters of coal deposits, microflora, Kuzbass.

#### Введение

Представленный материал является составной частью значительной работы по изучению геохимии подземных вод Кузнецкого угольного бассейна [1, 2]. Начатое бурение территории для добычи угольного метана позволило на Нарыкско-Осташкинской площади обнаружить и опробовать уникальные содовые воды высокой минерализации (до 27 г/л) с тяжелым изотопным составом водорастворенного углерода ( $\delta^{13}$ C(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) до +31 ‰,  $\delta^{13}$ C(CO<sub>2</sub>) до +22 ‰), о которых неоднократно писалось [1, 2]. Такие данные для Кузбасса получены впервые. Однако имеются зарубежные публикации, где приводятся положительные значения  $\delta^{13}$ C углекислого газа в местах добычи сланцевого газа и угольного метана крупных угольных бассейнов США и Австралии [3]. Исследователи полагают, что ускоряет процесс формирования тяжелой CO<sub>2</sub> микробиальная редукция биогенного вещества. Наиболее насыщенное бактериями газовое месторождение бассейна Иллинойс имеет самые высокие положительные  $\delta^{13}$ C (+22.5 ‰) [4].

В связи с этим нами была предпринята попытка изучить микробиологическую активность в водах угольных пластов, которой ранее не уделялось особого внимания. Для этого были отобраны пробы воды и собраны ранее не опубликованные данные о микрофлоре вод с августа по ноябрь 2012 г., а также отобраны новые в ноябре 2020 г. К сожалению, в 2012 г. имелась информация только о бактериях геохимического цикла углерода. Но в случае угольных месторождений микробная трансформация соединений углерода играет решающую роль. Некоторые данные о речных водах Кузбасса, а также углекислых минеральных водах показаны в работах [5, 6]. Однако в зоне замедленного водообмена, непосредственно угольных отложений, детальные исследования не проводились. Объектами исследований в данной работе стали не только подземные, но и поверхностные воды, что позволит провести сравнительный анализ, а в дальнейшем использовать полученные результаты при различных экологических исследованиях.

#### Объект и методы исследований

Исследуемая площадь расположена в Ерунаковском районе Кемеровской области в центральной части Кузнецкого угольного бассейна. В геологическом строении площади принимают участие угленосные терригенно-осадочные отложения ерунаковской подсерии верхнепермского возраста, осадки триаса, юры, а также отложения четвертичного возраста. Гидрогеологические условия территории детально были приведены в работе [2]. На изученной территории существует прямая вертикальная гидродинамическая зональность, в соответствии с которой по интенсивности водообмена выделяются две зоны: активного и замедленного водообмена.

В данной работе нами изучено несколько водных объектов: 1) озера, 2) реки, 3) подземные воды активного водообмена, 4) подземные воды замедленного водообмена.

Особый интерес представляют последние, циркулирующие непосредственно в пределах угольных отложений на глубинах от 400 до 1200 м и ниже, отличающиеся необычно высокой для содовых вод минерализацией и аномально тяжелым изотопом углерода.

На микробиологический анализ было отобрано: в 2012 г. – 28 проб воды (2 – озерные, 6 – речные, 20 – подземные, включая 6 из угольных отложений), в 2020 г. – 6 проб воды (2 – речные, 4 – подземные, включая 2 из угольных). Посев производился в течение суток после отбора, при этом пробы хранились в сумке-холодильнике. Для выявления микроорганизмов использовали жидкие и твердые элективные питательные среды. Выделение и количественный учет микроорганизмов проводили по известным классическим методикам [7, 8].

Пробы 2012 г. изучались по шести физиологическим группам микроорганизмов, круговороте углерода: энтеробактерии участвующих (неспороносные факультативные анаэробы); психрофильные сапрофиты (растущие при низких температурах); олиготрофы (растущие при минимальном количестве органического нефтетолерантные (безразличные К содержаниям нефти нефтеокисляющие; железоокисляющие. Пробы 2020 г. дополнительно изучались по семи физиологическим группам микроорганизмов, участвующих в круговороте азота, серы и аммонифицирующие, нитрифицирующие, денитрифицирующие, углерода: (серобактерии), целлюлозоразрушающие аэробные и анаэробные, мезофильные сапрофиты (развивающиеся при средних температурных условиях).

По способу питания микроорганизмы бывают двух групп: 1) автотрофные, способные синтезировать органические соединения из неорганических (железобактерии, денитрифицирующие, нитрифицирующие и тионовые) и 2) гетеротрофные микроорганизмы, использующие для синтеза своего организма готовые органические вещества (все остальные).

#### Результаты исследований и их обсуждение

Полученные результаты микробиологического анализа представлены в таблице. Поскольку выборка достаточно громоздкая, мы ограничились пределами содержаний и средним значением по каждому водному объекту. Кратко опишем каждый.

Озерные воды отобраны из двух озер, расположенных на территории разреза Таежный. Одно озеро заболоченное, с соленостью 0.13~г/л и рН 6.7; другое — более соленое (0.63~г/л) и щелочное (рН 7.8). Состав гидрокарбонатный кальциевый, содержание  $C_{\text{орг}} - 5.4 - 15.3~\text{мг/л}$ . Для них из микроорганизмов, участвующих в круговороте углерода, характерны только психрофильные бактерии. Другие бактерии не выявлены.

Речные воды. В пределах исследуемой площади отобраны пробы воды из рек Черновой Нарык (основная водная артерия), Казанчушка, Березовая, Большая и Малая речки, Осиновка, Талда и Кыргай. Речные воды пресные (0.3–0.6 г/л) слабощелочные и щелочные (рН от 7.6 до 8.9), гидрокарбонатные кальциевые с достаточно высоким содержанием органического вещества (Сорг от 2.4 до 36.6 мг/л). Из гетеротрофных бактерий основное распространение получили олиготрофные и психрофильные сапрофиты. Иногда встречаются энтеробактерии, а также только здесь встречаются целлюлозоразрушающие аэробные и анаэробные бактерии. При исследовании рек Кыргай и Талда в 2020 г. были выращены в больших количествах автотрофные микроорганизмы: нитрифицирующие, денитрифицирующие и тионовые. Две первые группы бактерий в количестве 100 тыс. кл/мл оказались на первом месте среди общего количества бактерий.

Подземные воды зоны активного водообмена распространены в верхней части разреза, сложенной рыхлыми преимущественно четвертичными отложениями, и в зоне интенсивной трещиноватости юрских отложений. Это пресные (соленость от 0.4 до 0.8 г/л) воды, которые распространены до глубины ориентировочно 150 м. По химическому составу воды гидрокарбонатные кальциевые, в основном нейтральные, реже слабощелочные, рН не превышает 8.0.

Содержание некоторых групп бактерий в природных водах Нарыкско-Осташкинской площади, кл/мл

Годы	1	20		2020			
Водные объекты	00000	to Olevi	подземн	ые воды	<b>20</b> OTCH	подземн	ные воды
водные ооъекты	озера	реки	a/B*	3/B**	реки	a/ <b>B</b> *	3/B**
Геохимический цикл углерод	)a						
Энтеробактерии	0	<u>0–1300</u> 240 (6)	<u>0–680</u> 56 (23)	10–27 800 6 837 (6)	10-70 35 (2)	0	1 300–5 600 3 450 (2)
Психрофильные сапрофиты	1 100–12 800 4 633 (3)	110–28 000 10 307 (3)	<u>0–72 800</u> 9 333 (15)	13 400–18 000 15 800 (3)	2 440–6 250 4 345 (2)	40–1 440 740 (2)	7 660–9 550 8 605 (2)
Мезофильные сапрофиты	_	-	-	-	<u>0–200</u> 10 (2)	<u>0–50</u> 25 (2)	17 500–18 900 18 200 (2)
Олиготрофы	0	3 120–50 500 26 940 (3)	2 370–94 200 36 077 (10)	15 900 (1)	14 000–18 400 16 200 (2)	340–6 240 3 290 (2)	9 180–15 780 12 480 (2)
Индекс олиготрофности	0	0.1–9.6 4.86 (2)	0.12–35 10 (9)	0.9 (1)	2.2-7.5 4.9 (2)	0.3–155.1 77.7 (2)	0.4–2.0 1.2 (2)
Нефтетолерантные	0	0	1 200–29 300 7 724 (5)	6 000 (1)	_	-	_
Нефтеокисляющие	0	0	120–200 190 (4)	570–570 570 (1)	-	-	-
Железоокисляющие	0	0	<u>0–270</u> 68 (4)	0	_	-	-
Целлюлозоразрушающие аэробные	_	_	_	_	10–100 55 (2)	0	0
Целлюлозоразрушающие анаэробные	_	-	-	_	10–100 55 (2)	0	0
Геохимический цикл азота							
Аммонифицирующие	_	-	-	_	100 (2)	<u>0–10</u> 5 (2)	100–10 000 5 050 (2)
Нитрифицирующие	-	-	-	_	100 000 (2)	10 000–100 000 55 000 (2)	10 000 (2)
Денитрифицирующие	-	_	_	_	100 000 (2)	100-1 000 550 (2)	100 000 (2)
Геохимический цикл серы						, ,	
Тионовые	_ 		_	_	10 000–100 000 55 000 (2)	<u>0–100</u> 50 (2)	100–100 000 50 500 (2)

Примечание. \* – активного водообмена; \*\* – замедленного водообмена, прочерк – исследования не проводились.

Как и в случае с речными пробами, в подземных водах зоны активного водообмена из гетеротрофных бактерий превалируют олиготрофные и психрофильные сапрофиты. Однако спектр выращенных бактерий намного больше, чем в речных водах: имеются энтеробактерии, нефтетолерантные, нефтеокисляющие и железоокисляющие (в одной пробе). В 2020 г. в двух пробах были выращены в больших количествах нитрифицирующие (10–100 тыс. кл/мл), денитрифицирующие (100–1000 кл/мл), тионовые (до 100 кл/мл), мезофильные (до 50 кл/мл) и аммонифицирующие (до 10 кл/мл) бактерии.

Подземные воды зоны замедленного водообмена залегают в песчаных средне- и верхнепермских угленосных отложениях, частично в эффузивно-осадочных отложениях триаса. Верхняя граница их распространения находится на глубине от 100–200 м, нижняя – 1200 м. Резко возрастает минерализация вод (до 27 г/л), рН сначала растет (до 9.9), потом немного уменьшается (из-за угольного СО2) в пределах 7.5–8.5. Состав вод становится повсеместно гидрокарбонатным натриевым. Для данных вод при узком диапазоне исследований в 2012 г. повсеместное превалирование было за энтеробактериями (10.0–27.8 тыс. кл/мл). Психрофильные сапрофиты обнаружены только в трех пробах, а олиготрофные, нефтеокисляющие и нефтетолерантные – в одной. При более детальных исследованиях в 2020 г. на первое место вышли денитрифицирующие (100 тыс. кл/мл), затем тионовые (1 тыс. – 100 тыс. кл/мл), мезофильные (17.5 тыс. – 18.9 тыс. кл/мл), нитрифицирующие (10 тыс. кл/мл), олиготрофные (9.2 тыс. – 15.8 тыс. кл/мл), психрофильные (7.7 тыс. – 9.5 тыс. кл/мл), аммонифицирующие (100 – 10 тыс. кл/мл), энтеробактерии на последнем (1.3 тыс. – 5.6 тыс. кл/мл). Тем не менее необходимо отметить, что энтеробактерии выросли во всех изучаемых пробах.

Таким образом, первые данные о микрофлоре вод показали достаточно неоднозначные результаты. К тому же широкий спектр бактерий был установлен только в шести пробах 2020 г., и по ним пока трудно делать однозначные выводы. Несмотря на это, авторы попытались выделить общие особенности распределения микрофлоры в природных водах изученной территории.

1. Как правило, в подземных водах меньше микроорганизмов, чем в поверхностных, но в условиях угольных пластов картина иная. Повсеместно в пределах Нарыкско-Осташкинской территории подземные воды более обогащены бактериями, чем речные и озерные воды, и они более разнообразны по групповому составу.

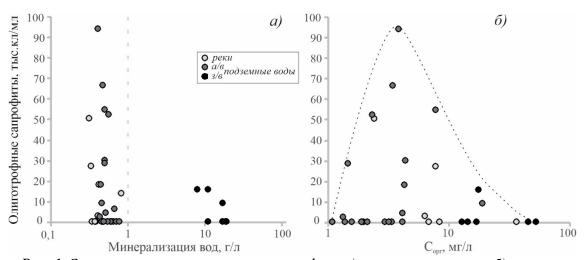


Рис. 1. Зависимость содержания олиготрофов: a) от солености вод и  $\delta$ ) от показателя  $C_{opr}$ .

2. Олиготрофных сапрофитов закономерно больше в пресных водах (рис. 1, a), поскольку они растут в достаточно бедных средах,  $C_{opr}$  1 мг/л и меньше. В водах с высокими содержаниями органических веществ такие бактерии, как правило, расти не могут и погибают. В нашем случае при  $C_{opr} > 10$  мг/л, концентрации олиготрофов падают (рис. 1,  $\delta$ ). Это же подтверждает и высокий индекс олиготрофности (таблица), который характеризует

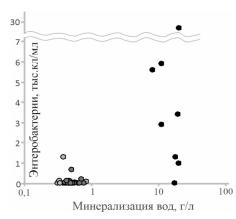


Рис. 2. Зависимость содержаний энтеробактерий от солености вод.

способность микробного сообщества ассимилировать из рассеянного состояния элементы питания. Он составляет в среднем для пресных вод 5–80, для угольных соленых – 0.9–1.2. Чем выше его значение, тем к более бедным условиям питания приспособлены микроорганизмы.

- подземных водах зоны замедленного водообмена угольных отложений много энтеробактерий и мезофильных сапрофитов сравнению ПО Для мезофильных такая вышезалегающими водами. закономерность получена только по шести пробам (по двум с каждого объекта), поэтому трудно делать однозначные выводы. Энтеробактерии концентрируются в среде с минерализацией более 10 г/л (рис. 2), при этом четкой зависимости от показателя  $C_{\text{орг}}$  не выявлено.
- 4. Наиболее активно во всех водах (речных и подземных) развиваются бактерии группы азота и серы. Больше всего нитрифицирующих и денитрифицирующих, т.е. превращающих аммиак в нитраты и нитраты в азот. Меньше всего аммонифицирующих гнилостных анаэробных бактерий, разлагающих азотсодержащие органические соединения. Достаточно хорошо представлена тионовая группа бактерий. Однако зависимости количественного содержания этих бактерий от минерализации, рН вод или от содержаний растворенных азотных и серных соединений не наблюдается. Можно только уверенно сказать о том, что минимальные концентрации микроорганизмов характерны для подземных вод активного водообмена. Мигрируя в угольные отложения, вода обогащается бактериями до уровня поверхностных вод и даже выше.

#### Заключение

Первые данные о микрофлоре природных вод, приуроченных к территории добычи угольного метана, позволили дополнить предыдущие геохимические исследования и получить некоторые особенности распределения. Подземные воды более обогащены бактериями, чем поверхностные, и они более разнообразны по групповому составу. Олиготрофных сапрофитов больше в пресных водах, энтеробактерий — в соленых водах угольных отложений. Максимальные концентрации бактерий, по-видимому, характерны для группы азота и серы, но данных недостаточно. Каких-либо четких зависимостей концентраций микроорганизмов от химического и органического состава вод в настоящее время не выявлено.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 20-05-00127 и 19-05-00290.

- 1. Лепокурова О.Е. Содовые подземные воды юга Кузбасса: изотопно-химические особенности и условия формирования // Геохимия. 2018. № 9. С. 904—919.
- 2. Шварцев С.Л., Лепокурова О.Е., Пономарчук В.А., Домрочева Е.В., Сизиков Д.А. Аномальный состав изотопов углерода в подземных щелочных водах Кузбасса // ДАН. 2016. 469 (6). С. 724–728.
- 3. Colding S., Boreham C.J., Esterle J.S. Stable isotope geochemistry of coal bed and shale gas and related production waters // International Journal of Coal Geology. 2013. 120. P. 24–40.
- 4. Савичев О.Г. Реки Томской области: состояние, использование и охрана. Томск: Изд-во ТПУ, 2003.
- 5. Копылова Ю.Г., Лепокурова О.Е., Токаренко О.Г. Условия формирования химического состава Терсинских углекислых минеральных вод // Водные ресурсы. 2009. 36 (5). С. 606-614.
- 6. Schlegel M.E., McIntosh J.C., Bates B.L., Kirk M.F., Martini A.M., 2011. Comparison of fluid geochemistry and microbiology of multiple organic-rich reservoirs in the Illinois Basin, USA: evidence for controls on methanogenesis and microbial transport // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. 75. P. 1903–1919.
- 7. Романенко В.И., Кузнецов С.И. Экология микроорганизмов пресных вод. Лабораторное руководство. М.: Наука, 1974. 194 с.
- 8. Нетрусов А.И., Егорова М.А., Захарчук Л.М. и др. Практикум по микробиологии. М.: ACADEMA, 2005.

# МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ ТУНКИНСКОЙ ДОЛИНЫ: ЗАДАЧИ ИЗУЧЕНИЯ В СВЯЗИ С МАССОВЫМ РАЗВИТИЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ТУРИЗМА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-83-87

Пехатинов А.М.  $^{1}$ , Оргильянов А.И. $^{2}$ , Лехатинова Э.Б. $^{1}$ , Крюкова И.Г. $^{2}$   $^{1}$  Национальный парк «Тункинский», Кырен, lexam29@mail.ru  $^{2}$  Институт земной коры СО РАН, Иркутск, aiorgil@crust.irk.ru

**Аннотация.** В статье дается описание источников субминеральных вод Тункинской долины. Приводятся сведения об их температуре, составе, условиях разгрузки и практическом использовании. Подчеркивается необходимость их дальнейшего изучения и охраны.

Ключевые слова: Тункинская долина, субминеральные воды, экологический туризм.

**Abstract:** In this paper the description of submineral springs from Tunka valley is presented. The information about their temperature, chemical composition, conditions of discharge and practical application was given. The necessity of their subsequent investigation and protection was emphasive.

**Key words:** Tunka valley, submineral waters, ecological tourism.

#### Введение

Экотуризм – огромный не использованный пока потенциал России. Наша задача – интегрировать природные территории в экономику региона. Под таким девизом в 2020 г. проведен всероссийский конкурс на создание туристско-рекреационных кластеров и развитие экотуризма в России. Тункинский национальный парк вошел в десятку лучших территорий (кластеров) по уникальным туристическим и рекреационным ценностям, прежде всего по божественно красивой природе и богатому набору «Аршанов». «Аршан» побурятски – это исключительно приятная на вкус и целебная родниковая вода, утоляющая жажду и улучшающая здоровье человека, сакральное место отдыха. Рекреационнооздоровительный потенциал Тункинской долины обеспечит развитие экологического туризма. Ключевая роль в экотуризме сохранится за минеральными и термальными подземными водами. Экологический туризм в нашем понимании – это благоприятное познавательное путешествие по территории с хорошо сохранившимися природными ландшафтами, чистыми водой и воздухом.

Туристско-рекреационный кластер (ТРК) «Тункинская долина» расположен в пределах «Древнего темени Азии» по В.А. Обручеву. «Темя» как геологический центр Азии обозначен в с. Монды Тункинского района Республики Бурятия, а географический центр Азии находится в городе Кызыл Республики Тыва. На «темени» широко распространены древнейшие архей-протерозойские экологически чистые породы, обусловливающие мощную энергетическую природную среду. Оба центра, геологический и географический, представляют повышенный интерес в Евразии, поэтому более правильно окончательно назвать ТРК «Тункинская долина – темя Азии». Одним из важнейших природных богатств (Саяно-Байкальского природного «Древнего темени Азии» комплекса) являются минеральные воды. В Тункинской долине находятся широко известные проявления термальных вод Аршан, Жемчуг и Нилова Пустынь, а также железистые воды Хонгор-Уула. Кроме того, нельзя обойти вниманием и так называемые субминеральные воды, т.е. воды, не содержащие в своем составе кондиционных количеств бальнеологически активных компонентов, но пользующиеся большой популярностью у местного населения в качестве лечебных. Многолетний опыт бальнеологического использования таких вод не вызывает сомнения в эффективности их целебного воздействия. В настоящем сообщении дается характеристика ряда субминеральных источников, расположенных вдоль экологических троп Тункинской долины. И в связи с развитием широкомасштабного экологического туризма проведены рекогносцировочные обследования неизученных и слабоизученных водопунктов с отбором проб воды. Приводятся сведения об их составе и условиях разгрузки. Химические анализы проб воды, отобранных авторами, произведены в лабораториях Института земной коры СО РАН (макрокомпоненты) и Института геохимии СО РАН (микроэлементы). Нестойкие компоненты состава определялись непосредственно на месте отбора проб.

#### Субминеральные подземные воды (источники)

В соответствии с территориальным расположением здесь выделены две группы субминеральных источников: <u>Хамардабанская</u>, прослеживаемая вдоль подножия северного склона хребта Хамар-Дабан (правый борт Тункинской долины), и <u>Саянская</u>, расположенная в зоне Тункинского регионального разлома в узлах его пересечения с локальными разломами субмеридионального простирания (левый борт Тункинской долины) [1, 2].

# Хамардабанская группа источников

*Мондинский*. Координаты N 51°40.144′; Е 100°59.176′. Абс. отм. 1323 м. Находится на юго-западной окраине с. Монды, у подножия горы, сложенной неогеновыми базальтами. Выход мочажинного типа с дебитом 0.1 л/с. Зимой образуется большая наледь, которая заливает полотно автодороги Монды — Орлик, проходящей в 20 м севернее выхода источника. Минерализация довольно высокая (более 0.5 г/л). Повышенное содержание нитрат-иона объясняется влиянием сточных вод жилого поселка, расположенного выше по склону. Источник среди местного населения считается лечебным, хотя большой популярностью не пользуется. Подход к источнику не оборудован.

Мойготский. Координаты N 51°38.774′; Е 101°25.198′. Абс. отм. 990 м. Находится в 2 км к востоку от с. Мойготы, в правом борту долины р. Иркут. Сосредоточенный каптированный выход у автодороги Култук — Монды с дебитом 0,3 л/с. Формируется за счет потока аллювиальных вод. Считается, что употребление воды этого источника помогает снимать посталкогольный синдром, поэтому источник имеет народное название «антипохмелин». Обустроена площадка отдыха с укрытием, соблюдается благоприятная экологическая обстановка рекреационной местности.

Халагунский. Координаты N 51°34,568'; E 101°25,376'. Абс. отм. 895 м. Впервые обследован И.М. Борисенко в 1965 г. Находится в безлюдной таежной местности в 17 км к юго-западу от с. Туран, по обоим берегам р. Халагун (местное название р. Далбайка, поэтому источник имеет местное название Далбай холын аршан). Источник приурочен к зоне разлома северо-восточного простирания, секущего архейские породы слюдянской представленные мраморами, гнейсами и кварцитами. Дебит основного выхода составил 0.15 л/с. В воде отмечено повышенное содержание сероводорода (2.9 мг/л). О связи источника с зоной разлома свидетельствует высокое содержание растворенного гелия  $-9.73\times10^{-3}$  мл/л, что в 187 раз превышает величину атмосферного фона. Несмотря на свою удаленность и относительную труднодоступность, «дикий курорт» пользуется большой популярностью для лечения костно-мышечных, кожных и других заболеваний. Вода используется в виде питья и ванн, для которых она подогревается на костре.

*Хутунский*. Координаты N 51°40′; E 101°32′. Абс. отм. 1000 м. Находится в 3 км к югу от с. Хойто-Гол, на восточном берегу оз. Шара-Нур. Приурочен к контакту неогеновых базальтов с водно-ледниковыми отложениями. По данным Ю.И. Кустова [3], температура воды 6.3 °C. Содержание сероводорода 4.5 мг/л. Источник мало изучен и практически не описан в литературе.

Туранский. Координаты N 51°38.508′; Е 101°43.185′. Абс. отм. 884 м. Находится в 2.5 км к востоку от с. Туран, у автодороги Култук — Монды. Источник выходит из-под глыб подножия горы, сложенной неогеновыми базальтами. Вода источника, разгружаясь в виде нескольких струй, стекает в каптажный желоб с дебитом 0,4 л/с. Имеется удобная площадка отдыха для туристов и проезжающих с местом парковки и туалетом. Источник пользуется большой популярностью у местных жителей, которые специально приезжают сюда с канистрами за «серебре́ной» водой.

*Шармак*. Координаты N 51°35′; E 102°15′. Абс. отм. 830 м. Находится в долине р. Харибяты, в 5 км к югу от автодороги Култук — Монды, у подножия северного склона хр. Гурби-Дабан. По-видимому, выходы этого источника связаны с той же разломной зоной субширотного простирания, к которой приурочены источники железистых вод Хонгор-Уула.

Источник разгружается в виде двух выходов, расположенных в 6 м друг от друга и имеющих общий каптаж. Вода холодная и используется в лечебных целях после подогрева в чанах на костре.

#### Саянская группа источников

Коймарский. Координаты N 51°48′; E 102°27′ [4]. Находится в 18 км к юго-западу от курорта Аршан, у подножия холма-останца кайнозойского вулкана. Вода характеризуется повышенным содержанием сероводорода (7.5 мг/л). Местное население считает источник лечебным.

Обо-Аршан. Координаты N 51°52.023′; Е 102°24.656′. Абс. отм. 736 м. Находится в 1 км от юго-восточной окраины с. Тагархай, на островке в заболоченной местности. Представляет собой сосредоточенный выход с незначительным дебитом (менее 0.1 л/с). Под слоем современных илистых отложений на глубине около 0.5 м отмечены отложения травертинов [5]. Этот факт, а также повышенное содержание углекислого газа (77 мг/л при титровании на месте) свидетельствуют о том, что этот источник представляет древний очаг разгрузки углекислых терм. Источник активно посещается людьми, вода считается лечебной, используется для питья, а место является культовым.

Кунтенский. Координаты N 51°49′; Е 102°26′. Абс. отм. 725 м. Находится в 10 км к югу от курорта Аршан, близ Койморских озер, на северном склоне небольшого вулканического холма, недалеко от правого берега р. Кынгарга [6]. Разгрузка происходит в виде нескольких грифонов, вода слабоминерализованная, гидрокарбонатная натриевомагниево-кальциевая с повышенным содержанием сероводорода. Используется местным населением в виде ванн при лечении заболеваний суставов.

*Никольский*. Координаты N 51°42,733′; E 102°35,922′. Абс. отм. 717 м. Находится в 2 км к юго-востоку от с. Никольского, у подножия склона левого берега р. Иркут, сложенного водно-ледниковыми образованиями. Имеет два сосредоточенных выхода в 50 м друг от друга с одинаковым дебитом (по 0.2 л/c). Вода считается лечебной, причем один из выходов (правый) называется «глазной», т.е. применяется при лечении глазных болезней.

*Цаган-Угун.* Координаты N 51°52′; Е 102°56′. Абс. отм. 750 м. Находится в 9 км к северо-востоку от с. Гужиры, у подножия правого коренного склона долины р. Цаган-Угун. Разгрузка осуществляется из-под крупноглыбовых отложений, следовательно, в питании вод источника значительная роль принадлежит процессам конденсации. Бальнеологические свойства вод этого источника известны давно. Во времена СССР здесь действовала здравница местного значения. В настоящее время источник активно посещается туристами, которых привлекает, помимо лечебных свойств воды, исключительная живописность окружающего ландшафта.

Субурга. Координаты N 51°53′; Е 102°21′. Абс. отм. 950 м. Местное название «Старый» или «Второй» Аршан [6]. Находится в 5 км к западу от курорта Аршан, у подножия Тункинского хребта. Представляет собой выход в виде нескольких струй из массива карстующихся карбонатных пород, которые ниже сливаются в озерко, имеющее живописный голубой оттенок. Возле выхода отмечены мощные отложения травертинов, что свидетельствует о существовании здесь палеоочага разгрузки углекислых терм. Несмотря на отсутствие в составе воды значимых содержаний бальнеологических компонентов, они активно используются для лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата (после подогрева). Для местного населения место выхода источника считается сакральным.

Папий Аршан. Координаты N 51°52′; Е 102°19′. Абс. отм. 960 м. Находится в 7.5 км к западу от курорта «Аршан», у подножия Тункинского хребта. Условия выхода аналогичны с источником Субурга. Он также пользуется большой популярностью у местных энтузиастов, и место выхода воды в карстовой воронке считается священным. Солнечная лесная поляна с одним домом и ванным сараем окружена лесом и черемушником. Лесная дорога от с. Тагархай до источника труднопроходима.

Химический состав описываемых источников представлен в таблице.

# 86

# Химический состав воды субминеральных источников Тункинской долины

	лимическии состав воды суоминеральных источников тункинской долины																		
Источник	t°, C	рН								ержа	ние, мг							I.	Дата обследования
			$NH_4^+$	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	$K^+$	Na <sup>+</sup>	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	Cl <sup>-</sup>	$SO_4^{2-}$	$HCO_3^-$	$CO_3^{2-}$	$\mathbf{F}^{-}$	$NO_2^-$	$NO_3^-$	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>		
										7	Хамард	абанска	я групі	та					
Мондинский	2.0	7.0	<0.1	<0.1	<0.1	6.8	19.2	33.0	77.2	12.1	49.4	347.8	0.0	0.3	0.2	31.0	16.0	$M_{0,59} = \frac{HCO_375SO_414NO_37}{Ca51Mg36(Na+K)13}$	12.08.2020
Мойготский	4.3	7.6	<0.1	<0.1	<0.1	3.1	3.3	10.5	48.1	1.8	16.3	195.3	0.0	0.3	<0.01	0.9	11.0	$M_{0,29} \frac{HCO_3 89 SO_4 9}{Ca69 Mg25 (Na+K)6}$	13.08.2020
Халагунский	6.0	9.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.9	134.5	0.1	3.0	28.4	161.3	73.2	21.6	7.9	<0.01	<0.5	80.0	M <sub>0,51</sub>	04.07.2007
Хутунский	6.3	ı	ı	_	_	_	Ι	_	ı	ı	_	_	_	_	_	_	21.0	M <sub>0,44</sub>	[3]
Туранский	7.2	7.8	<0.1	<0.1	<0.1	2.3	17.2	3.7	40.1	2.8	19.8	159.9	0.0	0.7	< 0.01	1.3	21.0	$\frac{HCO_383SO_413}{Ca64(Na+K)26Mg10}$	12.08.2020
Шармак	_	6.6	<0.1	1.	.2	2.5	7.6	17.0	33.1	1.4	31.3	158.7	0.0	0.1	1.0	1.3		$\frac{HCO_{3}78SO_{4}19}{Ca48Mg41(Na+K)11}$	10.08.2011
											Сая	нская гр	оуппа						
Коймарский	4.0	7.7	_	_	-	4.1	7.1	23.1	32.1	1.8	4.0	200.1	0.0	0.3	0	0	34.0	$M_{0,31} \frac{HCO_396}{Mg48 Ca41 (Na+K)11}$	11.06.1989
Обо-Аршан	6.8	6.7	<0.1	<0.1	<0.1	2.5	4.6	34.1	94.2	3.9	30.0	421.0	0.0	0.4	<0.01	1.33	22.0	$M_{0,61} \frac{HCO_390SO_48}{Ca60Mg36}$	11.08.2020
Никольский	6.1	7.6	0.1	<0.1	0.1	3.4	14.3	31.4	53.5	1.8	<2.0	351.5	0.0	0.3	<0.01	<0.44	52.5	$\frac{HCO_{3}99}{Ca45 Mg43 (Na+K)11}$	11.08.2020
Цаган-Угун	_	6.95	<0.1	<0.1	<0.1	2.0	2.3	27.4	39.1	1.4	22.2	228.2	0.0	0.1	0.2	<0.44	14.0	M <sub>0,34</sub> HCO <sub>3</sub> 88 SO <sub>4</sub> 11 M <sub>g</sub> 52 Ca45	10.08.2011
Субурга	_	8.0	-	_	-	0.8	1.8	23.1	39.1	2.1	32.9	173.3	1.2	0.3	0	0	11.0	M <sub>0,29</sub> HCO <sub>3</sub> 79 SO <sub>4</sub> 19 Ca49 Mg48	11.06.1989
Папий- Аршан	5.5	7.7	0	0	0	1.0	2.5	7.3	38.1	2.5	6.0	146.5	0.0	0.3	0.0	0.0	13.6	$\frac{HCO_{3}92}{Ca72 Mg23 (Na+K)5}$	01.06.1986

К основным объектам экотуризма относятся бальнеолечебные и рекреационные местности Тункинской долины, которая богата не только минеральными водами, но и сапропелевыми и сульфидными грязями в районах впадинных озер. Запасы грязей являются практически неисчерпаемыми при условии регенерации [6].

Места выходов минеральных вод нуждаются в организации зон санитарной охраны для исключения загрязнения источников отходами жизнедеятельности человека. О наличии такого загрязнения свидетельствуют повышенные содержания нитритов и нитратов в воде ряда опробованных водопунктов (таблица).

Нельзя забывать и о том, что минеральные источники часто располагаются в местностях, считающихся священными. Органы местной власти и руководство Национального парка должны осуществлять контроль за хозяйственной деятельностью в таких местах.

#### Заключение

Начатое изучение субминеральных вод на экологических тропах Тунки рассматривается как начало ведения мониторинга минеральных и пресных подземных вод особо охраняемых природных территорий в связи с активизацией развития массового туризма. Системное наблюдение за составом и состоянием подземных вод необходимо для выявления закономерностей их истощения, загрязнения, а также нарушений естественной защищенности в условиях повышенной туристической нагрузки на гидрогеологические системы. Прогнозирование изменения состояния природной среды парков и заповедников под воздействием нарастающих антропогенных нагрузок позволит оптимально и рационально использовать ресурсы охраняемой природы, не допуская изменения экологической обстановки. Субминеральные источники, как и официально действующие курорты, пользуются все возрастающей популярностью. Пройти курс лечения или просто отдохнуть сюда приезжают не только жители Иркутской области и Бурятии, но и туристы из отдаленных регионов России и других государств. Нет никакого сомнения в том, что в настоящем сообщении описаны далеко не все источники, имеющие лечебное значение, поэтому необходимо продолжать изучение субминеральных вод как в отношении гидрогеологии и гидрогеохимии, так и относительно влияния их на организм человека.

- 1. Лехатинов А.М. Малоизвестные целебные минеральные подземные воды Тункинской особо охраняемой природной территории // Мат-лы I Междунар. научно-практич. конф. «Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов». Республика Тыва. ГУП РТ «Курорт Чедер», 17–20 июня 2013. С. 69–72.
- 2. Лехатинов А.М., Оргильянов А.И. Термальные минеральные и пресные питьевые подземные воды рекреационных ландшафтов Тункинской впадины и их использование // Подземная гидросфера: Мат-лы XX Всерос. совещания по подземным водам востока России. Иркутск: Изд-во ООО «Географ», 2012. С. 474—478.
- 3. Кустов Ю.И. Подземные минеральные воды в Тункинском регионе юго-западного фланга Байкальского рифта // Отечественная геология. 2009. № 2. С. 53–60.
- 4. Ткачук В.Г., Яснитская Н.В., Анкудинова Г.А. Минеральные воды Бурят-Монгольской АССР. Иркутск: ВСФ АН СССР, 1957. 153 с.
- 5. Павлов С.Х., Пиннекер Е.В., Писарский Б.И. Углекислые воды Тункинской впадины (Восточный Саян) // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 9. С. 28–35.
  - 6. Ботороев К.С. Курорт Аршан. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1991. 96 с.

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-88-92

# Mopapy K.E.

Институт геологии и сейсмологии, Кишинев, Молдова, cmoraru@yahoo.com

Аннотация. На примере территории юго-западной части Причерноморского артезианского бассейна выполнена сравнительная оценка естественных ресурсов подземных вод 17 самостоятельными методами. Для обработки данных использованы методы параметрической статистики, кластерного и факторного анализа. Картографирование осуществлялось при помощи Surfer 18.1. Выявляется методологическая неопределенность при выборе наиболее обоснованного метода и конечного результата для вероятных естественных ресурсов подземных вод с учетом существующих природных условий. Предложено использовать кластерный анализ для обобщающих значений ресурсов, а для точных расчетов — метод главных компонент факторного анализа. Картографирование естественных ресурсов подземных вод целесообразно проводить алгоритмами интервальных значений.

Ключевые слова: подземные воды, ресурсы, методология.

Abstract. Comparative estimation of groundwater resources by 17 separate methods has been implemented using as example territory of the Pre-Black Sea artesian basin south-west part. For data processing methods of parametric statistics, cluster and factorial analyses were exploited. Surfer 18.1 was used for mapping. Methodological uncertainty appears in selecting the better legitimate method and respectively results for probable groundwater resources based on natural conditions. Cluster analysis for summative recourses and factor analysis with method of main components for accurate calculations were proposed. Mapping of groundwater resources is advisable to provide by interval algorithms.

Key words: groundwater, resources, methodology.

В современной гидрогеологии вопрос о естественных ресурсах подземных вод является дискуссионным и неоднозначно интерпретируемым. В настоящее время существует целый спектр методов определения естественных ресурсов подземных вод показывает, что такие исследования являются сложными, трудоемкими и без четких методических указаний [2, 3]. Ввиду таких условий необходимо применять различные методы оценки ресурсов подземных вод. При этом учитываются наличие, доступность, качество исходного материала и расчетные алгоритмы методов в виде компьютерных программ. Цель настоящих исследований состояла в сравнительном анализе 17 методов определения естественных ресурсов подземных вод на примере юго-западной части Причерноморского артезианского бассейна.

#### Объекты и методы исследований

Объектом исследований является крайняя юго-западная часть Причерноморского артезианского бассейна (ЮзПАБ) (географически совпадает с территорией Республики Молдова). Для расчетов использованы многолетние данные по 40 гидрометрическим постам, были обработаны и рассчитаны среднемноголетние значения осадков и испарения на 18 метеорологических станциях и 20 метеопостах. Для отдельных методов использовались не только данные мониторинга подземных вод по регулярной государственной сети, но и информация по другим скважинам за разные периоды времени с длиной ряда не менее одного года. Для количественной оценки подземного стока были использованы следующие методические подходы: 1) метод водного баланса [4–7], 2) метод расчленения гидрографа по К.П. Воскресенскому [8], 3) метод меженных расходов [9, 10], 4) метод Part [11], 5) метод RORA [12], 6–16) методы Base Flow Index (BFI) [13], включающие десять отдельных методов (метод местного минимума; метод фиксированного интервала; метод скользящего интервала; однопараметрический алгоритм; двухпараметрический алгоритм; трехпараметрический алгоритм; алгоритм Линие и Холлика; алгоритм Чампмана; фильтр Фарей и Гупма; фильтр Ечкхардта; фильтр EWMA) и 17) метод WTF (Water Table Fluctuation) [14–16]. Геостатистические расчеты были выполнены с использованием компьютерного пакета программ SPSS 22 [17], а для предварительной оценки были использованы приложения Excel 2016. Теоретические основы статистических расчетов представлены в самой программе SPSS 22, а также в работах [18, 19]. Картографирование естественных ресурсов подземных вод выполнено при помощи продукта компании Golden software — программа Surfer 18.1 [20]. Также картографический материал был обработан с использованием программы QGIS.

#### Результаты и обсуждение

Обобщенные данные по 43 речным бассейнам представлены в таблице.

Параметрическая статистика величины ресурсов подземных вод по разным методам (в мм)

			7.1					
Параметр/Метол	1	2	3	4	5	6	7	8
Среднее	22.81	29.95	33.85	19.34	17.66	21.66	28.39	15.88
Медиана	21.56	27.61	31.73	18.60	18.12	21.14	26.27	15.24
Станд. отклонение	14.37	15.91	17.48	9.87	9.42	11.80	15.96	9.51
Дисперсия	206.4	253.0	305.6	97.3	88.8	139.4	254.7	90.5
Эксцесс	1.25	-0.45	-0.83	-0.75	-0.39	-0.67	-0.09	-0.69
Асимметрия	0.95	0.34	0.20	0.23	0.44	0.32	0.55	0.36
Минимум	2.25	3.17	4.44	2.66	2.26	2.89	3.46	1.44
Максимум	63.63	65.77	68.20	40.35	39.05	47.83	67.38	37.72
Коэф. вариации	0.63	0.53	0.52	0.51	0.53	0.54	0.56	0.60

продолжение таблицы

Параметр/Метол	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Среднее	12.34	26.3	27.5	20.0	26.98	31.59	15.99	14.80	26.84
Медиана	8.72	25.2	26.2	21.6	26.77	29.76	13.03	11.89	15.00
Станд.	10.13	15.4	15.9	9.82	16.22	16.72	13.67	12.71	21.29
Дисперсия	102.6	240.	255.	96.4	263.0	279.6	186.9	161.5	453.1
Эксцесс	1.50	0.45	0.04	0.53	-0.13	-0.62	4.68	5.40	-1.25
Асимметрия	1.19	0.74	0.60	0.05	0.56	0.28	1.88	2.03	0.67
Минимум	0.16	3.30	3.17	0.80	3.05	4.13	1.40	0.94	4.00
Максимум	46.23	67.6	67.4	45.9	68.02	70.46	64.36	60.78	64.00
Коэфф. вариации	0.82	0.59	0.58	0.49	0.60	0.53	0.86	0.86	0.79

Примечание. Методы: 1 — метод местного минимума; 2 — метод фиксированного интервала; 3 — метод скользящего интервала; 4 — однопараметрический алгоритм; 5 — двухпараметрический алгоритм; 6 — трехпараметрический алгоритм; 7 — алгоритм Линие и Холлика; 8 — алгоритм Чампмана; 9 — фильтр Фарей и Гупма; 10 — фильтр Ечкхардта; 11 — фильтр EWMA; 12 — метод баланса; 13 — PART (SUA); 14 — RORA (SUA); 15 — метод К.Р. Воскресенского; 16 — метод меженных расходов; 17 — WTF.

Анализ данных таблицы показывает, что величина естественных ресурсов подземных вод зависит от метода определения. Установлено, что она определяется территориальной дифференциацией природных условий и имеет трендовую направленность уменьшения с севера на юг исследуемой территории. В этом же направлении уменьшаются ресурсы поверхностных вод, количество атмосферных осадков и увеличиваются значения температуры воздуха, испарения и испаряемости.

Каждый метод имеет свои алгоритмические особенности, поэтому несовпадения результатов определения ресурсов подземных вод следует принять как нормальное явление. Анализ параметрической статистики показывает, что данные ресурсов подземных вод близки к нормальному закону (закон Гаусса) распределения. В этом случае аномальная величина ресурсов встречается редко, а значения, близкие к средней величине, — часто. Для подтверждения нормального распределения были определены ошибки репрезентативности асимметрии ( $m_A$ ) и эксцесса ( $m_E$ ). Расчетные значения ошибок репрезентативности асимметрии и эксцесса составляют  $m_A = 0.37$  и  $m_E = 0.74$ . Далее последовательно были вычислены абсолютные значения асимметрии и эксцесса. В соответствии с этими параметрами и условиями нормальности — ненормальности, по всем методам величина естественных ресурсов подземных вод имеет нормальное статистическое распределение, за исключением методов Воскресенского и меженных расходов. Анализ данных таблицы

показывает, что для этих методов нет значимой разницы между стандартными отклонениями, коэффициентами вариации (меньше 1.0), средним значением и медианой. Следовательно и данные методов Воскресенского, меженных расходов близки к нормальному распределению, и в дальнейшем анализе для них принимаем условное соответствие нормальному закону распределения.

В итоге можно отметить: а) средние значения ресурсов подземных вод статистически верны и представительны для исследованных речных бассейнов; б) ряды величин среднего значения ресурсов подземных вод статистически однородны и в) предлагается использовать средние значения для сравнительного анализа методов определения естественных ресурсов подземных вод другими процедурами геостатистики.

Кластерный и факторный анализ использованы для исследования взаимосвязи результатов определения ресурсов подземных вод применяемыми методами [17]. На уровне Евклидового расстояния 10 и меньше кластерным анализом выделяются три кластера: 1) методы Линие, EWMA, PART, Чампмана, однопараметрический, Ечкхардта, фиксированного интервала, скользящего интервала, двухпараметрический алгоритм, RORA, местного минимума, Воскресенского, меженных расходов и Фарея, 2) метод баланса и 3) WTF. В первом кластере существуют сильные корреляционные линейные связи. Кластеры 2 и 3 слабо связаны корреляционно с остальными методами.

Результаты кластерного анализа показывают статистические взаимоотношения между методами с использованием меры связи в виде Евклидового расстояния [17, 21]. Первый кластер объединяет методы, основанные на расчленении речного гидрографа, второй – метод баланса воды в речном бассейне и третий – метод, основанный на интерпретации вариаций уровней грунтовых вод. Величины естественных ресурсов подземных вод в пределах выделенных кластеров также различны (таблица).

Несмотря на хорошую информативность кластерного анализа в области статистической взаимосвязи исследованных методов, этот способ не позволяет выделить наиболее характерный и репрезентативный метод для исследуемой территории. В таком случае логично найти среднее значение ресурсов подземных вод в первом кластере и принять его как осредненное для каждой гидрологической станции. Полученные данные соответствуют выявленному общему региональному тренду изменения естественных ресурсов подземных вод исследуемой территории. Тем не менее оценка ресурсов подземных вод по первому кластеру не позволяет оценивать статистический вклад каждого метода в среднее значение, и остаются неучтенными данные второго и третьего кластеров. Для такого подхода это существенный недостаток.

Факторный анализ [17], который выполнен на основе применения метода главных компонент и без вращения факторов, позволяет устранить отмеченные недостатки. Учет совокупной дисперсии для 17 методов позволяет выделить одну главную компоненту — N 1, с собственным значением 14.295, составляющую 84.09 % от обшей дисперсии и с суммарной дисперсией 84.09 %. Остальные компоненты (методы) составляют суммарно 15.01 % и незначительно влияют на факторы, определявшие главную компоненту. Исходя из результатов факторного анализа, уравнение расчета естественных ресурсов подземных вод (R) в пределах каждого гидрологического бассейна имеет следующий вид:

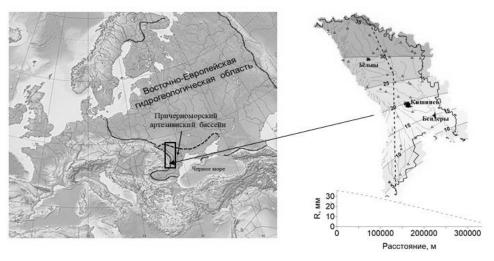
 $R=0.8409M_1+0.06063M_2+0.03701M_3+0.02356M_4+0.01533M_5+0.0082M_6+0.0038M_7+0.0036M_8+0.0021M_9+0.0015M_{10}+0.0011M_{11}+0.0009M_{12}+0.0007M_{13}+0.0002M_{14}+0.0001M_{15}+0.0001M_{16}+0.00002M_{17},$  где  $M_{1-17}-$  значения величины естественных ресурсов из таблицы.

Эту формулу можно сократить до  $M_8$  (включительно), так как суммарная дисперсия факторов до этого предела составляет 99.298 %. В соответствии с этой формулой были рассчитаны региональные естественные ресурсы подземных вод исследуемой территории. Вновь полученные данные также статистически очень близки к величинам первой компоненты или первого метода (местного минимума). Между средним значением ресурсов

подземных вод по первому кластеру и ресурсами, рассчитанными по факторному анализу (R), существует статистически сильная линейная корреляционная связь ( $r^2 = 0.94$ , r = 0.97).

Анализ статистических остатков в виде простой разницы между значениями ресурсов подземных вод по первому кластеру и ресурсами, рассчитанными по факторному анализу (R), выделяет следующие параметры: максимальное значение -6.17 мм, минимальное  $-(-10.63\,$  мм), среднее значение  $-(-0.45\,$  мм), абсолютное среднее значение  $-2.67\,$  мм. Аномальных значений всего четыре (более  $\pm 4.0\,$  мм), и остатки в основном варьируются в интервале  $\pm 4.0\,$  мм. Это хорошие и допустимые результаты сравнения значений ресурсов подземных вод, определенных по первому кластеру, и ресурсов, рассчитанных по факторному анализу (R).

Картографическая цифровая модель ресурсов подземных вод была составлена на основе данных, рассчитанных по формуле факторного анализа (рисунок). Карта построена при помощи программы SURFER [20] с использованием алгоритма полиноминальной регрессии Ві-линейного сглаживания второго порядка.



Картосхема естественных ресурсов подземных вод территории юго-западной части Причерноморского артезианского бассейна (в мм).

Уравнение планарной поверхности имеет вид: Z = (-3.49)x + 0.0001y + (-522.49), где Z — значение естественных ресурсов подземных вод, мм; x — координата (X); y — координата (Y).

По этому уравнению были рассчитаны изолинии карты. По нашему мнению, представление естественных ресурсов подземных вод в виде интервальных оценок соответствует природным условиям исследуемой территории.

#### Выводы

Выявляется методологическая неопределенность при выборе наиболее обоснованного метода и конечного результата для вероятных естественных ресурсов подземных вод с учетом существующих природных условий. Методически существующие методы оценки естественных ресурсов подземных вод несовершенные и неуниверсальные. Во избежание формирования убеждения о единственном верном конечном результате, целесообразно использовать несколько методов оценки ресурсов подземных вод. При этом выбранные методы должны различаться по алгоритму и исходным данным (например, Балансовый и RORA методы). Сравнение полученных результатов необходимо производить методами геостатистики при условии приведения данных к одинаковой плоскости (или в одинаковых точках).

Для исследуемой территории оценка естественных ресурсов выполнена с применением 17 самостоятельных методов. Только по величине арифметического среднего значения (при условии нормального закона распределения) естественных ресурсов подземных вод некорректно сравнивать методы. Необходимо привлечь синтезирующие методы, как

кластерный и (или) факторный анализ. При этом, несмотря на хорошую информативность кластерного анализа в области статистической взаимосвязи исследованных методов, этот способ не позволяет выделить наиболее характерный и репрезентативный метод для исследованной территории. Факторный анализ на основе применения метода главных компонент и без вращения факторов позволяет устранить отмеченные недостатки. Рассчитана совокупная дисперсия для 17 методов. Исходя их результатов факторного анализа, предложено уравнение расчета естественных ресурсов подземных вод на основе вклада каждого метода в совокупную дисперсию.

Региональная оценка естественных ресурсов подземных вод территории юго-западной части Причерноморского артезианского бассейна обоснована специальными расчетами и представлена в виде цифровой картографической модели. Метод картирования — полиноминальная регрессия Ві-линейного сглаживания второго порядка. Этот метод выделяет на карте интервальные значения естественных ресурсов в виде слоя стока в миллиметрах.

Исследования были выполнены при финансовой поддержке Государственной программы Молдовы 2020 – 2023 гг., грант 20.80009.7007.26.

- 1. Xu Y. Beekman H.E. Groundwater recharge estimation in Southern Africa // UNESCO IHP, 2003, Series no. 64, UNESCO Paris. 206 p.
- 2. Arnold J.G., Allen P.M. Validation of automated methods for estimating base flow and ground water recharge from streamflow records // Journal. Am. Water Resource. Assoc. 1999. 35. P. 411–424.
- 3. Islam S., Sing R.K., Kham R.A. Methods of estimating groundwater recharge // International Journal of Engineering Associates. 2015. 7. Vol. 5, issue 2. P. 5–9.
- 4. Гопченко Е.Д., Лобода Н.С. Водные ресурсы Северо-Западного Причерноморья (в естественных и нарушенных антропогенной деятельностью условиях). Киев: КНТ, 2005. 188 с.
  - 5. Зеленин И.В. Естественные ресурсы подземных вод Молдавии. Кишинев: Штиинца, 1972. 214 с.
- 6. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во Московского университета, 1960. 344 с.
- 7. Xu C.-Y., Sing V.P. A review of monthly water balance for water resource investigations // Water Resource Management. 1998. 12. P. 31–50.
- 8. Воскресенский К.П. Опыт разработки методики прогнозов меженного режима рек Европейской части СССР // Труды ГГИ, 1940, вып. 10. Л.: Гидрометеоиздат. С. 21–43.
- 9. Филипова И.А. Минимальный сток рек европейской территории России и его оценка в условиях ухудшения климата: Автореф. дис. . . . кандидата географических наук. М., 2014. 27 с.
- 10. Bormann H., Pinter N. Trends in low flows of German rivers since 1950; Comparability of different low-flow indicators and their spatial patterns // River Research and Applications. 2017. 33(7). P. 1191–1204. doi:10.1002/rra.3152.
- 11. Rutledje A.T. Computer programs for describing the recession of groundwater discharge and for estimating mean groundwater recharge and discharge from streamflow records (update) // Water resources investigation report 98-4148, 1998, USGS, USA. 52 p.
- 12. Rorabaugh M.I. Estimating changes in bank storage and ground-water contribution to streamflow // Int. Assoc. Sci. Hydrol. 1964. 63. P. 432–441.
  - 13. BFI-Software for baseflow separation from a hydrogram, 2013. In: <a href="https://hydrooffice.org/">https://hydrooffice.org/</a>>.
  - 14. Каменский Г.Н. Основы динамики подземных вод. М.: Госгеолиздат, 1943. 307 с.
- 15. Биндеман Н.Н., Язвин Л.С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод (2-ое издание). М.: Недра, 1970. 216 с.
- 16. Healy R.W., Cook P.G. Using groundwater levels to estimate recharge // Hydrogeology Journal. 2002, Vol. 10, № 1. P. 91–110.
- 17. Statistical package for the social sciences (SPSS 22). <www.ibm.com/us-en/marketplace/spss-statistics> (as 22.11.2017).
- 18. Гавич И.К., Семенова С.М., Швец В.М. Методы обработки гидрогеологической информации с вариантами задач. М.: Высшая школа, 1981. 160 с.
- 19. Rock N.M.S. Numerical geology // Lecture notes in Earth sciences, 1988, Vol. 18. Berlin: Springer-Verlag. 427 p.
  - 20. Surfer, ver. 18.1 (64-bit). https://www.goldensoftware.com/.
  - 21. Дюран Б., Оделл П. Кластерный анализ. М.: Статистика, 1977. 16 с.

# РАЙОНИРОВАНИЕ СЕВЕРА СИНАЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА ПО ФИЛЬТРАЦИОННЫМ СВОЙСТВАМ ДОЧЕТВЕРТИЧНЫХ ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-93-95

Мохамед Я.Ш., Виноград Н.А.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, silentyasser@yahoo.co.uk

Аннотация. Выделение территорий с хорошей обеспеченностью подземными водами особенно важно в засушливых регионах, таких как, например, Синайский полуостров. Значения коэффициента фильтрации и литологические свойства вмещающих пород дочетвертичных водоносных горизонтов являются основой районирования территории по фильтрационным свойствам водовмещающих пород. На основе GIS, карт распространения водоносных горизонтов, составленных авторами, а также программы SPSS для статистического анализа получены схемы районирования территории в соответствии со значениями коэффициента фильтрации. Эта работа имеет важное народнохозяйственное значение и позволяет планировать экономическое развитие Синайского полуострова.

**Ключевые слова:** подземные воды, коэффициент фильтрации, дочетвертичные водовмещающие породы, Синайский полуостров, Египет.

**Abstract.** Determining an area with good aquifer productivity is very important, especially in such arid regions, like Sinai. The values of hydraulic conductivity and the lithologic properties of Pre-Quaternary aquifers is a basis for the delineation of groundwater areas according to the filtration properties of host rocks. Using the GIS software, maps of aquifers compiled by the authors, and the SPSS software for the statistical analysis, the zoning schemes for the Pre-Quaternary aquifers according to the values of hydraulic conductivity have been created. The results are of great practical importance for the national economy; they create awareness for better economic planning on Sinai.

Keywords: Groundwater, hydraulic conductivity, Pre-Quaternary water-bearing rocks, Sinai, Egypt.

Описание гидрогеологических условий севера Синайского полуострова основано на результатах исследований, проведенных ранее на этой территории, в том числе и в последние годы [1–6]. Информация по гидрогеологическим скважинам, использованная в работе, взята из сводного отчета «North Sinai Groundwater Resources Study in the Arab Republic of Egypt» [7], а также предоставлена Институтом водных исследований (WRRI) Министерства ирригации и водных ресурсов Арабской Республики Египет [8–13].

Программа Географической информационной системы (ArcGIS Desktop 10.6 – версия 10.6.0.8321) — полезный и точный инструмент, который использовался для подготовки всех типов перспективных карт Северного Синая и исследуемой территории. Кроме того, программа Статистического пакета для социальных наук (SPSS Statistics 17.0.0) использовалась для подготовки статистического анализа для сбора скважинных данных, значений гидравлической проводимости для различных водоносных горизонтов в районе исследования.

В рамках работы была обновлена информация ПО всем существующим Северного гидрогеологическим скважинам В регионе Синая, эксплуатирующим дочетвертичные водоносные горизонты. Результатом систематизации стала соответствующая база данных, в которую вошли материалы по 128 скважинам. Дочетвертичные отложения Северного Синая представлены породами эоцена, палеоцена, сенона, турона, сеномана, нижнего мела и юры, широко распространенными на всей территории исследования. В гидрогеологическом отношении наиболее важен литологический состав вмещающих пород, поэтому для статистического анализа было решено выделить только водоносные горизонты известняков и песчаников, распространенные практически на всей территории Северного Синая, независимо от возраста их образования. Был проведен анализ распределения значений коэффициента фильтрации К (м/сут), полученных при полевых испытаниях скважин. Результаты расчета статистических параметров показаны в таблице (таблица). Из таблицы видно, что величины средних и медианных значений коэффициентов фильтрации в известняках и песчаниках дочетвертичных отложений имеют один и тот же порядок. В то же время наблюдается очень большой разброс значений коэффициента фильтрации в пределах

каждого из рассмотренных образцов: в известняках — от 0.10 до 113 м/сут, в песчаниках — от 0.13 до 87 м/сут. Таким образом, очевидно, что проницаемость всех дочетвертичных отложений определяется не фильтрационными свойствами в пористых блоках, а интенсивностью трещиноватости как известняка, так и песчаника.

Статистические параметры распределения значений коэффициента фильтрации (К, м/сут) в различных водоносных горизонтах дочетвертичных отложений

Параметр	Bce	Известняки	Песчаники
Число анализов	128	68	60
Среднее	13	19	7
Медиана	4	4	4
Станд. отклонение	24	29	13
Минимум	0.01	0.01	0.13
Максимум	112.97	112.97	86.50

Мощность водоносного горизонта в известняках варьируется от 254 м (максимальная глубина) до 5 м (минимальная глубина) в некоторых районах при средней глубине 129.5 м в известняковом водоносном горизонте. Мощность водоносного горизонта песчаников колеблется от 300 м (максимальная) до 17 м (минимальная) в некоторых частях со средней мощностью 158.5 м и может увеличиваться в соответствии с будущими исследованиями.

Районирование территории по значениям коэффициента фильтрации дочетвертичных отложений в пределах Северного Синая является чрезвычайно важным с точки зрения оценки перспектив водоснабжения рассматриваемой территории. Карты, составленные по результатам районирования, представлены для водоносных горизонтов известняков (рис. 1) и песчаников (рис. 2).

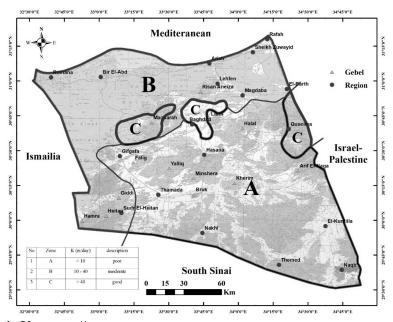


Рис. 1. Карта районирования водоносного горизонта известняков.

Как показано на этих рисунках, на огромной части территории Северного Синая развиты водовмещающие дочетвертичные породы (как известняки, так и песчаники) со средними и низкими значениями коэффициентов фильтрации (зоны А и В). Области с высокими коэффициентами фильтрации (зона С) отмечены только в отдельных локальных зонах. С практической точки зрения можно констатировать, что наиболее перспективными для добычи подземных вод из водоносных горизонтов (без учета их химического состава) являются следующие районы: район Эль-Кусайма, Эль-Гуварир и Гебель Эль-Магара для

водоносного горизонта известняков и вокруг Айн-Кадейса, Гебель-Анейга, а также Рафахе и Шейх-Зувайед для водоносного горизонта песчаников.

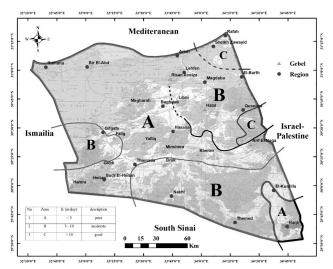


Рис. 2. Карта районирования водоносного горизонта песчаников.

- 1. Abdel-Shafy H.I. and Kamel A.H., Groundwater in Egypt Issue: Resources, Location, Amount, Contamination, Protection, Renewal, Future Overview. The Egyptian Journal of Chemistry. 2016. Vol. 59. No. 3, P. 321–362.
- 2. Abdel Raouf O., Investigation of groundwater flow heterogeneity in fractured aquifers (Case study: Qusiema area, North Sinai). International Journal of Water Resources and Environmental Engineering. 2014. Vol. 6(11). P. 279–286.
- 3. Mekawy M.S., Taphonomy of Aptian-Albian Beds in the Gebel Mistan, Maghara Area, Northern Sinai, Egypt. Journal of Earth Science Climate Change. 2013. Vol. 4. Issue 2, ISSN:2157-7617.
- 4. Elewa H.H., and Qaddah A.A., Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS-watershed-based modeling. Hydrogeology Journal of Springer-Verlag, 2011. Vol. 19. P. 613–628.
- 5. Abd El Aal G.A., Thesis: Hydrogeology and Land Use Classification of North Sinai Peninsula with the Environmental Impact of Groundwater on Exploitation and Pollution, Egypt. 1998.
- 6. Shata A.A., Hydrogeology of the Great Nubian Sandstone basin, Egypt // Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. 1982. Vol. 15. P. 127–133.
- 7. Japan International Cooperation Agency (JICA), Main report: North Sinai Groundwater Resources Study in the Arab Republic of Egypt, 1992. https://www.jica.go.jp/english/
- 8. Министерство водных ресурсов и ирригации. «Атлас наводнений долин Синайского полуострова». Нил Корниш Имбаба. Египетская Арабская Республика, 2017. www.mwri.org.eg (на арабском языке).
- 9. Министерство водных ресурсов и ирригации. «Атлас изменения климата Синайского полуострова». Нил Корниш Имбаба. Египетская Арабская Республика, 2016. www.mwri.org.eg (на арабском языке).
- 10. Государственное министерство по вопросам окружающей среды Агентство по вопросам окружающей среды, провинция Северный Синай Управление по вопросам окружающей среды, (2007). Экологическая характеристика провинции Северный Синай. Мухафаза Северный Синай. Египетская Арабская Республика (на арабском языке).
- 11. База данных Главного управления Египта по минеральным ресурсам. Аль-Вайли Каир. Египетская Арабская Республика (на арабском языке).
- 12. База данных научно-исследовательского института водных ресурсов Национальный центр водных исследований Министерство водных ресурсов и ирригации Арабская Республика Египет, 2018. <a href="https://www.mwri.org.eg">www.mwri.org.eg</a> (на арабском языке).
- 13. База данных Института исследования изменения климата Национальный центр водных исследований Министерство водных ресурсов и ирригации Арабская Республика Египет. www.mwri.org.eg (на арабском языке).

# МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА: ИССЛЕДОВАНИЯ ПОСЛЕДНИХ ЛЕТ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-96-100

Оргильянов А.И. $^1$ , Копылова Ю.Г. $^2$ , Аракчаа К.Д. $^3$ , Гусева Н.В. $^2$ , Хващевская А.А. $^2$ , Крюкова И.Г. $^1$ , Бадминов П.С. $^1$ , Рычкова К.М. $^4$ , Шестакова А.В. $^5$ , Солдатова Е.А. $^6$ , Сметанина И.В. $^2$ , Аюнова О.Д. $^4$ 

 $^{1}$ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, aiorgil@crust.irk.ru  $^{2}$  Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, unpc\_voda@mail.ru

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт медико-социальных проблем и управления Республики Тыва, Кызыл, chodura@yandex.ru

<sup>4</sup>Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, klara6@inbox.ru

<sup>5</sup>Центр корпоративной медицины, г. Томск, ashest91@mail.ru
<sup>6</sup> Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, Москва, sea@geokhi.ru

**Аннотация.** В настоящей статье рассмотрены результаты исследований минеральных вод Тувы за последние годы. Дано описание минеральных источников и соленых озер согласно гидроминеральным областям и районам. Результаты исследований будут использованы для дальнейшего развития сети курортов и повышения качества лечения больных.

**Ключевые слова:** проявления минеральных вод, субминеральные источники, бальнеология, химический состав, соленые воды и рассолы.

**Abstract:** In this paper the results of investigations of mineral waters of Tuva for the last years are presented. The description of mineral springs and salt lakes in accordance with hydromineral regions was given. The results of investigations will use for further expansion of health resort network and for improvement of patient's treatment.

**Key words:** manifestations of mineral waters, submineral springs, balneology, chemical composition, salt waters and brines.

Минеральные воды являются одним из основных природных богатств Республики Тыва. На ее территории представлены практически все их типы. С незапамятных времен лечебные свойства минеральных вод были известны охотникам и скотоводам, а народные целители и буддийские ламы владели методами организации лечения на «диких» курортах.

Планомерное изучение гидроминеральных ресурсов Тувы началось в первой половине XX века. Этой теме были посвящены работы В.М. Левченко, К.Ф. Богородицкого, В.И. Валединского, А.О. Блюменфельда и др. В середине 1960-х годов изучением минеральных вод Тувы занимались ученые Института земной коры СО АН СССР под руководством Е.В. Пиннекера [1, 2]. В дальнейшем исследования минеральных вод Тувы проводились учеными ТКО СО АН СССР (К.С. Кужугет, К.Д. Аракчаа) с привлечением ученых из Иркутского госуниверситета (Г.М. Шпейзер и др.) и Томского политехнического института (М.Б. Букаты, А.И. Сурнин и др.). В этот период был проведен ряд экспедиций по минеральным источникам Тувы. В 1995 г. К.Д. Аракчаа опубликовала брошюру «Слово об аржаанах Тыва», где на русском и английском языках описаны наиболее известные минеральные источники республики и рассмотрен феномен лечения на аржаанах. Е.В. Пиннекер в работе [1] назвал источники, в воде которых отсутствуют биологически активные компоненты, «лжеаржаанами». Однако многолетний опыт лечения на этих источниках свидетельствует о несомненном оздоровительном эффекте [3]. Позднее Б.И. Писарский для таких вод предложил более корректное название «субминеральные». Несомненно то, что лечебное воздействие вод аржаанов обусловлено не только их составом, но и мобилизацией внутренних резервов организма за счет энергетики местностей, где расположены выходы минеральных вод. Ученые из Научно-исследовательского института медико-социальных проблем и управления Республики Тыва (К.Д. Аракчаа и др.) и Томского института курортологии и физиотерапии (И.Н. Смирнова и др.) в 2012–2014 гг. провели широкомасштабные медико-биологические (донозологические) исследования стихийного лечения на 30–35 проявлениях минеральных вод (природные источники, солено-грязевые озера) in situ, которые показали высокий оздоровительный эффект [4].

Особое внимание исследователей привлекает проявление термальных углекислых вод Чойган, расположенное в горах Восточного Саяна, в Тоджинском районе. Этот уникальный гидроминеральный комплекс пользуется большой популярностью не только среди жителей Тувы, но и у многочисленных туристов из различных регионов, которые приходят в основном с территории Бурятии. Под руководством К.Д. Аракчаа и О.К. Ооржак в 2012–2014 на источниках Чойгана проведены медико-биологические исследования среди принимающих лечебные процедуры. Оценивалось состояние сердечно-сосудистой системы, показатели анализов крови, мочи и т.д. до начала курса процедур и по его окончании. Выявлено, что после лечения минеральными водами Чойгана наступает статистически значимое повышение уровня здоровья у обследованных пациентов. Минеральным водам Чойгана были посвящены три издания красочного альбома «Аржаан Чойган – целительная жемчужина Тувы» (К.Д. Аракчаа, И.Н. Смирнова, Ю.Г. Копылова). Особенности формирования состава углекислых вод Чойгана рассмотрены Микробиологическое разнообразие этих вод изучалось учеными из Улан-Удэ (Е.С. Кашкак, Э.В. Данилова, В.В. Хахинов, Д.Д. Бархутова), Москвы и Калининграда (А.А. Корженков, С.Н. Гаврилов и др.). Начиная с 2013 г. совместным коллективом специалистов из Кызыла (Институт медико-социальных проблем и управления), Томска (Политехнический университет) и Иркутска (Институт земной коры СО РАН) проводились экспедиционные работы и на других гидроминеральных объектах республики. В процессе обследований отбирались пробы для изучения химического, газового и изотопного состава, микрофлоры, на месте отбора определялись нестойкие компоненты, измерялись температура, рН, Еh, электропроводность и радиоактивность воды. На карте (рисунок) выделен ряд гидроминеральных областей и районов с местоположением опробованных источников, а их список приведен в таблице. Анализы проб производились в лабораториях Томска, Иркутска и Новосибирска.

Ареалы распространения минеральных вод Тувы. Гидроминеральные области: I- Байкальская азотных кремнистых термальных вод, II- Восточно-Саянская углекислых холодных и термальных вод, III- Алтае-Западно-Саянская азотных холодных и термальных вод, IV- Центрально-Тувинская азотных холодных разнообразного состава, V- Убсу-Нурская азотных холодных соленых вод и рассолов. Гидроминеральные районы:  $I_1-$  Сангиленский холодных сульфидных вод,  $III_1-$  Западно-Саянский холодных кислых вод,  $IV_1-$  Дус-Хольский солоноватых вод и рассолов.

Ист	Істочники минеральных вод Республики Тыва						
No	Наименование водопункта	Тип воды	$T_{\text{воды,}}$ ${}^{\circ}C$	М, г/л	Химический состав	Год обсле- дования	
1	Чойган	Углекислые термы	40.3	2.52	HCO <sub>3</sub> Na-Ca	2013	
2	Оз. Чедер	Рассол	20.4	71.2	SO <sub>4</sub> -Cl Na	2013	
3	Уургайлыг	Субминеральн.	3.1	0.24	HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	2013	
4	Оз. Дус-Холь	D	26.0	150.7	CINI- M-	2012	
4	(Сватиково)	Рассол	26.0	150.7	Cl Na-Mg	2013	
5	Сватиково-Западный	Солоноватые	5.2	2.4	Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> Na-Mg-Ca	2015	
6	Сватиково-Восточный	Солоноватые	4.7	2.7	Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> Na-Mg	2015	
7	Тарыс	Азотные термы	46.5	0.51	SO <sub>4</sub> Na	2015	
8	Уш-Белдир	Азотные термы	82.3	0.60	HCO <sub>3</sub> -Cl Na	2016	
9	Оз. Каък-Холь	Соленые	24.3	13.6	SO <sub>4</sub> -Cl Na	2016	
10	Верхний Кадыр-Ос	Холодные СО2	9.6	0.93	HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	2016	
11	Нижний Кадыр-Ос	Холодные СО2	11.3	0.68	HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	2016	
12	Шандал-Ой	Холодные СО2	2.7	1.69	HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	2016	
13	Даштыг-Хем (Арыскан)	Холодные СО2	3.3	2.65	HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	2016	
14	Кижи-Хем	Углекисло- азотные термы	27.2	0.29	HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	2016	
15	Ийиспен	Холодные СО2	5.2	1.23	HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	2016	
16	Кундустуг (Бобры)	Субминеральн.	4.6	0.56	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca-Mg-Na	2017	
17	Ажыг-Суг	Кислый	6.4	5.6	SO <sub>4</sub> Mg-Ca	2017	
18	Оз. Мертвое	Рассол	_	60.0	SO <sub>4</sub> -Cl Na	2017	
19	Маймалыш	Азотные термы	38.3	0.30	HCO <sub>3</sub> -F-SO <sub>4</sub> Na	2017	
20	«Святой»	Субминеральн.	4.3	0.21	HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	2017	
21	Сайлыгский	Субминеральн.	1.7	0.06	HCO <sub>3</sub> Ca-Na-Mg	2017	
22	Демирлиг-Чоога	Кислый	_	99.4	SO <sub>4</sub> Fe-Al-Mg	2018	
23	Алдыы-Доргун	Субминеральн.	6.1	0.31	HCO <sub>3</sub> Na-Ca	2018	
24	Шаараш	Субминеральн.	4.7	0.17	HCO <sub>3</sub> Ca-Mg	2018	
25	Кум-Суу	Субминеральн.	8.6	0.55	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Mg-Ca-Na	2018	
26	Алдын-Уургай	Холодные H <sub>2</sub> S	4.5	0.42	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca	2018	
27	Бояй	Холодные H <sub>2</sub> S	7.4	0.43	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca-Na	2018	
28	Пош-Тей	Холодные H <sub>2</sub> S	16.8	0.42	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Na-Ca	2018	
29	Чолдуг	Субминеральн.	3.5	0.32	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca	2018	
30	Кара-Дыт	Субминеральн.	4.3	0.18	HCO <sub>3</sub> Ca	2019	
31	Шивилиг	Субминеральн.	6.5	0.09	HCO <sub>3</sub> Ca-Na	2019	
32	Шындазын	Субминеральн.	4.4	0.15	HCO <sub>3</sub> -Cl Ca-Na	2019	
33	Даг-Баары	Субминеральн.	6.9	0.23	Cl-HCO <sub>3</sub> Na-Ca	2019	
34	Элезинниг-Хову	Субминеральн.	3.0	0.09	HCO <sub>3</sub> -Cl Ca-Na	2019	
35	Уру	Азотные термы	18.3	0.23	SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> -Cl Na	2019	
36	Талдыг-Чарык	Субминеральн.	3.6	0.43	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Ca	2019	
37	Улаатай	Субминеральн.	4.9	2.08	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Mg-Ca	2019	
38	Тас-Тайга	Субминеральн.	9.7	0.05	HCO <sub>3</sub> Ca	2019	
39	Оз. Амдайгын-Холь	Солоноватые	27.2	7.6	SO <sub>4</sub> -Cl-HCO <sub>3</sub> Mg-Na	2019	
40	Оз. Шара-Нур	Соленые	24.1	30.3	Cl-SO <sub>4</sub> Na	2019	
41	Самоизлив. скважина у оз. Шара-Нур	Субминеральн.	11.4	0.35	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> -Cl Na	2019	
42	Оз. Дус-Холь (Самагалтайское)	Рассол	29.0	323.3	Cl Na-Mg	2019	

#### І. Байкальская гидроминеральная область азотных термальных кремнистых вод

Наиболее известным источником азотных термальных вод в Туве является Уш-Белдир, на базе которого действует курорт. Это самое высокотемпературное водопроявление в западной части Байкальской рифтовой зоны. К той же разломной зоне субмеридионального простирания, что и Уш-Белдир, относится проявление термальных вод Тарыс. Кроме гидрогеохимических исследований, на этом источнике проведены работы по изучению весьма своеобразной микрофлоры [6]. Менее известный, чем вышеупомянутые проявления азотных терм, источник Маймалыш находится в срединной части хр. Обручева. В составе его воды обнаружено высокое содержание фтора (25 мг/л).

# II. Восточно-Саянская гидроминеральная область углекислых холодных и термальных вод

Кроме описанного выше гидроминерального комплекса Чойган, в северо-восточной части республики, в удаленной труднодоступной горной местности, расположены ряд холодных углекислых источников и термальный источник Кижи-Хем. В газовом составе последнего преобладает азот, но наличие травертиновых отложений говорит о том, что ранее этот источник был углекислым. Были получены неизвестные ранее данные о микрокомпонентном составе этих вод [7], изотопии углерода и гелия.

# III. Алтае-Западно-Саянская гидроминеральная область азотных холодных и термальных вод

В эту область входит ряд субминеральных источников в западной части Тувы, среди которых выделяются проявления радоновых вод в нижней части бассейнов левых притоков р. Хемчик – рек Устю-Ишкин и Алдын-Ишкин. В верховьях р. Хемчик находится известное месторождение радоновых вод Шивилиг, приуроченное к контакту нижнедевонских и нижнекембрийских отложений с гранитной интрузией джойского комплекса. За последнее десятилетие оно было неоднократно обследовано авторами настоящего сообщения. Особо необходимо выделить также относящийся к этой области термальный источник Уру, расположенный на территории Красноярского края, недалеко от границы с Тувой. Вода этого источника имеет более низкую температуру и содержит меньше фтора и кремния, чем гидротермы Восточного Саяна и Байкальской рифтовой зоны, что объясняется меньшими величинами теплового потока в западной части региона, по сравнению с восточной. На относительно небольшом расстоянии от границ Республики Тыва находятся азотные термальные источники Абаканский горячий ключ (Республика Хакасия) и Джумалинский (Республика Алтай), что позволяет относить данную гидроминеральную область не только к холодным, но и к термальным водам.

# IV. Центрально-Тувинская гидроминеральная область азотных холодных вод различного состава

Для этой области характерны субминеральные источники, бальнеологическое применение которых сводится в основном к принятию холодного душа. В процессе исследований были впервые получены данные о микрокомпонентном составе этих вод. Здесь необходимо отметить источник Сайлыгский, который, несмотря на труднодоступное расположение (а.о. 1854 м), пользуется большой популярностью у местного населения.

#### V. Убсу-Нурская гидроминеральная область азотных холодных соленых вод и рассолов

Основным гидроминеральным ресурсом этой области являются соленые озера. На озере Шара-Нур организована база отдыха для пенсионеров южных районов республики. На озере Дус-Холь (Самагалтайское) частным образом добывают соль. Во время экспедиционных работ были отобраны пробы воды и грязей для подготовки заключений об их соответствии бальнеологическим стандартам.

В пределах гидроминеральных областей, в свою очередь, выделены гидроминеральные районы:

#### I<sub>1</sub> – Сангиленский гидроминеральный район сульфидных вод

Исследования последних лет, а также данные предшественников позволили выделить в нагорье Сангилен этот своеобразный район с развитием сульфидных вод. На источнике Алдын-Уургай большой популярностью пользуются именно сероводородные отложения бактериальных матов, используемые в пищу в лечебных целях. Изучение микрофлоры показало, что сероводород здесь имеет биохимический генезис.

#### III<sub>1</sub> – Западно-Саянский гидроминеральный район холодных кислых вод

На территории этого района отмечены проявления редко встречающегося в природе типа минеральных вод – купоросных кислых вод. Наиболее известным источником таких вод является источник Ажыг-Суг. Формирование химического состава воды происходит при взаимодействии с сульфидными минералами. Это подтвердилось лабораторным экспериментом, когда сухая порода из места выхода источника заливалась дистиллированной водой. Вода приобретала кислую реакцию в течение нескольких минут. В 2018 г. был обследован еще один источник кислых вод — Демирлиг-Чоога. Выход оказался сухим и выделялся только охристыми отложениями. При заливании этих отложений дистиллированной водой также достаточно быстро были получены низкие значения рН (около 3.5). Кислые воды имеют большую бальнеологическую ценность. Так, например, были проведены клинические испытания воздействия кислой воды источника Ажыг-Суг на подопытных крыс (С.М. Николаев, И.Н. Смирнова, С.М. Салчак, Я.Г. Разуваева и др.). Доказано ее гастропротективное влияние при развитии деструктивных повреждений слизистой оболочки желудка. Процессы формирования кислых вод весьма интересны и нуждаются в дальнейшем изучении.

# $IV_1$ – Дус-Хольский гидроминеральный район солоноватых вод и рассолов

Район включает в себя ряд солоноватых и соленых озер и родников, среди которых нужно выделить озеро Дус-Холь (Сватиково). Его южный берег застроен многочисленными домами отдыха. Кроме этого, оно активно посещается неорганизованными туристами из разных регионов России, что создает значительную антропогенную нагрузку на экосистему озера. Условиям формирования состава подземных минеральных вод территории этого района посвящена статья [8].

В каждом районе Республики Тыва есть проявления минеральных и субминеральных вод, на которых получают лечение десятки тысяч людей. В деле практического использования гидроминеральных богатств Тувы открываются большие перспективы. Так, на базе лечебных грязей оз. Чедер, при участии известного доктора-физиотерапевта С.М. Бубновского, планируется открытие оздоровительного центра «Чедер-Кинези».

В г. Кызыл, начиная с 2013 г. регулярно проводится Международная научнопрактическая конференция «Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов», куда приезжают известные специалисты гидрогеологи, курортологи, физиотерапевты и др. из разных регионов России и Монголии.

- 1. Пиннекер Е.В. Минеральные воды Тувы. Кызыл: Тувинское кн. изд-во, 1968. 106 с.
- 2. Пиннекер Е.В., Кустов Ю.И., Крутикова А.И. Закономерности распространения и состав подземных минеральных вод Тувы // Геология и геофизика. 1971. №11. С. 68–78.
- 3. Arakchaa K.D., Shpeizer G.V., Kujuget K.S., at al. Hydromineral resources Republic of Tuva // 11<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference & EXPO SGEM 2011. (Albena, Bulgaria. 19-25.06.2011.): Conference Proceedings, 2011. Vol. II. P. 859–866.
- 4. Смирнова И.Н., Аракчаа К.Д., Зайцев А.А. и др. Этномедицина в Республике Тыва: результаты комплексных медико-биологических исследований народных методов бальнеотерапии // Курортная медицина. 2014. Вып. 1. С. 23–28.
- 5. Копылова Ю.Г., Гусева Н.В., Аракчаа К.Д., Хващевская А.А. Геохимия углекислых вод природного комплекса Чойган (северо-восток Тувы) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, №11. С. 1635–1648.
- 6. Наливайко Н.Г., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г. и др. Микробиологический состав и эколого-геохимической состояние вод родников природного комплекса Тарыс // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов...: Мат-лы III Междунар. науч.-практ.конф. Республика Тыва, Кызыл, 2017, т. 3. Абакан: ООО «Кооператив "Журналист"», 2017. С. 201–218.
- 7. Оргильянов А.И., Аракчаа К.Д., Крюкова И.Г. и др. Минеральные воды Тоджинского района Республики Тыва // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов ...: Мат-лы III Междунар. науч.-практ.конф. Республика Тыва, Кызыл, 2017, т. 3. Абакан: ООО «Кооператив "Журналист"», 2017. С. 147–156.
- 8. Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Ойдуп Ч.К. и др. Формирование химического состава подземных солоноватых и рассольных вод Тувинского прогиба и его обрамления // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 3. С. 172–182.

# КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ И МАСШТАБЫ ТЕХНОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АПТ-АЛЬБ-СЕНОМАНСКИЙ ВОДОНОСНЫЙ КОМПЛЕКС ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-101-105

Павлюков А.И., Сальникова Ю.И.

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, salnikovaji@tyuiu.ru

Аннотация. Объектом исследования авторов является апт-альб-сеноманский водоносный комплекс (ААС ВК), заключающий в себе огромный ресурсный потенциал минерализованных подземных вод, способных обеспечить практически любую потребность в воде для системы поддержания пластового давления на месторождениях нефти и газа Западной Сибири. Комплекс с высокими емкостными и фильтрационными свойствами пород также используется в качестве поглощающего резервуара для размещения попутно добываемых вод. Анализ динамики добычи подземных вод ААС ВК за практически весь период пользования недрами в Западной Сибири позволяет говорить о некоторой стабилизации объемов извлекаемых вод. Выводы подтверждены современными данными по категоризации запасов месторождений подземных вод, суммарными дебитами закачки попутных вод, количеством водозаборов и пунктов закачки.

**Ключевые слова:** Западно-Сибирский мегабассейн, апт-альб-сеноманский комплекс, добыча подземных вод, закачка попутных вод.

**Abstract.** The object of the study by the authors is the Aptian-Albian-Cenomanian aquifer complex (AAS AqC). AAS AqC contains a huge resource potential of mineralized groundwater, capable of providing almost any water demand for the system of maintaining reservoir pressure in oil and gas fields in Western Siberia. The complex is characterized by high capacitive and filtering properties and therefore is also used as an absorbing reservoir for the placement of produced water. Analysis of the dynamics of groundwater production by AAS AqC for almost the entire period of subsoil use in Western Siberia suggests some stabilization of the volume of extracted water. The conclusions are confirmed by up-to-date data on the categorization of groundwater reserves, total production rates of associated water injection, the number of water intakes and injection points.

**Key words:** West Siberian megabasin, Aptian-Albian-Cenomanian complex, extraction of groundwater, associated water injection.

В Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции для поддержания пластового давления в залежах месторождений используются преимущественно подземные воды наиболее водообильного апт-альб-сеноманского водоносного комплекса (ААС ВК). Подземные воды рассматриваемого комплекса, имеющего региональное распространение, согласно гидрогеологической стратификации [1] относятся к мезозойскому гидрогеологическому бассейну Западно-Сибирского артезианского мегабассейна.

Водовмещающие отложения AAC BK обладают хорошими емкостнофильтрационными параметрами (пористость 12—42 %, проницаемость от  $215.8 \cdot 10^{-3}$  до  $504.8 \cdot 10^{-3}$  мкм) и колоссальной общей мощностью порядка 800 м (в его центральной части). ААС BK надежно изолирован сверху региональным кремнисто-глинистым водоупором турон-палеогенового возраста (до 800 м), снизу — преимущественно глинистыми осадками баррем-апта (до 200 м). В разведочных скважинах, вскрывших отложения AAC BK, до начала эксплуатации комплекса часто наблюдались самоизливы с превышением пьезометрического уровня над поверхностью земли до 10—40 м.

История гидрогеологического изучения ААС ВК, как и всего мезозойского гидрогеологического бассейна, относится к началу планомерных исследований нефтегазового потенциала Западной Сибири (1950-е годы прошлого столетия). Полученный комплекс данных по химическому составу подземных вод, растворенным газам, пластовым давлениям, статическим уровням, температуре и др. позволил обобщить первоначальные знания о глубокозалегающих подземных водах рассматриваемой провинции. В период с 1954 по 1959 г. эти гидрогеологические обобщения в качестве важных факторов при изучении перспектив нефтегазоносности отложений мезозоя Западно-Сибирской равнины рассматриваются в трудах Н.Н. Ростовцева, В.Ф. Никонова, О.В. Равдоникас, А.А. Розина.

В 1960-е годы в связи с продвижением буровых работ в центральные и северные районы Западно-Сибирского мегабассейна и расширением спектра гидрогеологических

исследований выходят в свет работы, посвященные методическим вопросам гидрогеохимического, геотермического и гидродинамического исследования и условиям формирования подземных вод, в которых в той или иной степени рассматривался вопрос об оптимальном источнике заводнения нефтяных пластов. Над обобщением данных материалов в этот период трудятся коллективы тематических партий «ЗапСибнефтегеология», «Тюменнефтегеология», «ЗапСибНефтегеофизика» и институтов ВСЕГЕИ, ВНИГРИ, СНИИГИМС и др. [2]. Здесь можно отметить вклад ученых-гидрогеологов Б.П. Ставицкого, Г.П. Богомякова, Г.А. Толстикова, В.М. Матусевича, А.Р. Курчикова, В.А. Нуднера, Ю.К. Смоленцева, В.В. Нелюбина и др.

Впервые метод поддержания пластового давления (ППД) для увеличения нефтеотдачи продуктивных отложений с применением подземных вод апт-сеномана был применен в 1966 г. Первыми нефтепромыслами, на которых зафиксирована добыча подземных вод из ААС ВК, стали Западно-Сургутское и Усть-Балыкское месторождения нефти (рис. 1). За первый год работы апт-сеноманских водозаборов (1966 г.) объем добытой воды составил 2.7 млн м<sup>3</sup>. Этот успешный опыт заводнения нефтяных пластов в дальнейшем изучался и был обобщен в работах таких авторов, как В.С. Быков, А.Д. Резник, Ю.Б: Фаин, Ю.П. Гаттенбергер, В.П. Дьяконов, Г.Д. Гинсбург, А.Д. Назаров и др.

В последующие годы, в связи с вводом в эксплуатацию новых водозаборных участков других месторождений нефти и газа, количество добытых подземных вод вплоть до первого десятилетия двухтысячных годов устойчиво росло (рис. 2). Следует отметить, что в конце XX в. наблюдались периоды снижения добычи апт-сеноманских вод: в 1990–1994 гг. объем извлекаемой воды упал на 30 %, в 1997–1999 гг. – на 18 %. Эти периоды совпадают с сокращением добычи нефти на фоне общемировой энергетической политики, что, безусловно, отразилось и на объемах апт-сеноманской воды, используемой в Западной Сибири для поддержания давления в нефтяных пластах.

В 2006 г. достигается максимальный объем извлечения подземных вод (243.69 млн м<sup>3</sup>), и по настоящее время добыча, с некоторыми колебаниями, ведется на одном уровне.

Накопленный объем добытой подземной воды со скромных 2.7 млн м<sup>3</sup> за полвека вырос до 7.4 млрд м<sup>3</sup>, а количество месторождений с организованной системой ППД, основанной на апт-сеноманской воде, увеличилось с двух до более трехсот тридцати. Кроме того, 282 лицензионных участка обладают освоенными и разведанными запасами – категория запасов «А» и «В» (таблица), т.е. добыча на данных участках разрешена и в настоящее время ведется. На 90 участках запасы считаются оцененными.

Вышеприведенные данные о количестве извлеченной воды и территорий, на которых эта добыча производится, говорят о действующей значительной техногенной нагрузке на апт-сеноманский водоносный комплекс Западно-Сибирского мегабассейна. Однако сегодня это воздействие не ограничивается только данным видом недропользования.

С начала XXI в. все большее распространение в Западной Сибири получает такой вид недропользования, как закачка попутных вод в ААС ВК. Данный вид деятельности связан, как правило, с увеличением обводненности извлекаемой нефти, что привело к созданию профицита попутных вод, перекрывающего потребность в воде системы поддержания пластового давления нефтяных месторождений.

В настоящее время на территории Западной Сибири действуют 166 пунктов закачки в ААС ВК, из которых 86 работают по промышленной категории, позволяющей вести непрерывную эксплуатацию данных пунктов в течение 20 лет.

На 2019 г. суммарный объем закачанной жидкости в апт-альб-сеноманский поглощающий горизонт составляет 671 млн  ${\rm m}^3$ , и, скорее всего, эта цифра в будущем будет только расти.

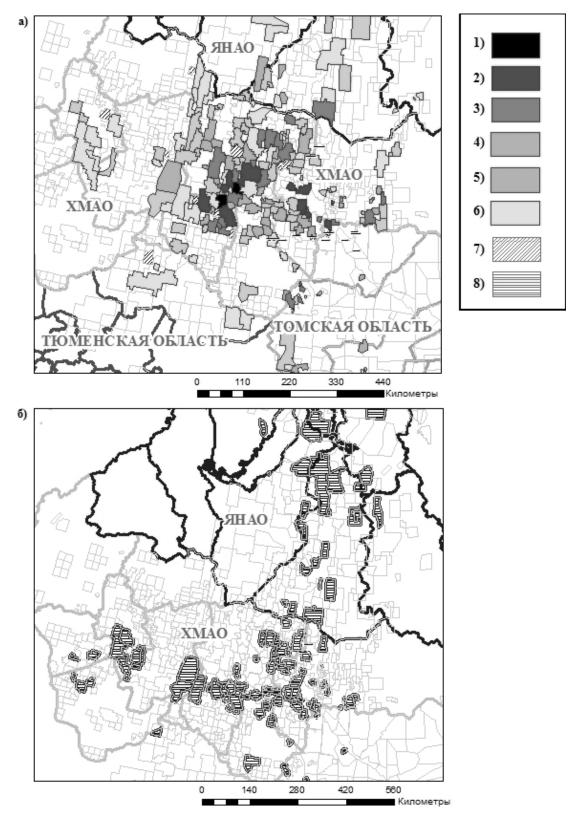


Рис. 1. Обзорная карта Западной Сибири с учетом использования ААС ВК. a — лицензионные участки с водозабором ААС ВК: I — 1966 г. — первые месторождения с ППД на основе вод ААС ВК; 2 — 1976—1975 гг.; 3 — 1976—1985 гг.; 4 — 1986—1995 гг.; 5 — 1996—2005 гг.; 6 — 2006—2015 гг.; 7 — 2016—2019 гг; 6 — 8 — лицензионные участки с пунктами закачки в ААС ВК.

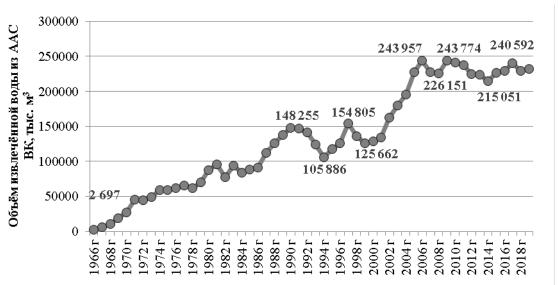


Рис. 2. Динамика добычи подземных вод ААС ВК в 1966–2019 гг.

Категоризация и величина запасов подземных вод апт-альб-сеноманского комплекса

Категория запасов	Количество лицензионных участков	Суммарная величина запасов, тыс. м <sup>3</sup> /сут		
A	7	83.5		
В	275	2789.4		
$C_1$	60	239.7		
C <sub>2</sub>	30	58.9		

Кроме того, существует прецедент использования ААС ВК Западно-Сибирского мегабассейна в качестве резервуара для захоронения жидких отходов подготовленных в виде пульпы на специальной установке путем измельчения частиц и достижения необходимой вязкости взвеси. Технология закачки осуществляет метод гидроразрыва пласта-коллектора: образовавшиеся трещины, смыкаясь, запечатывают в себе твердую фазу пульпы, а жидкая фаза отфильтровывается и смешивается с пластовыми водами горизонта [3]. Данная технология закачки подготовленного бурового шлама успешно применяется при разработке месторождений морского шельфа как в России, так и за рубежом. Это актуально и на нефтепромыслах Западной Сибири, где гидрологические и геоморфологические особенности территории не позволяют организовать шламовые амбары с точки зрения экологической безопасности.

Также на газовых месторождениях в Ямало-Ненецком автономном округе активно разрабатываются сеноманские залежи. Здесь под газовую залежь, наряду с попутной водой, осуществляется закачка флюидов, образующихся в процессе осушения природного газа (моно-, ди-, триэтиленгликоль) и других стадий (добычи, подготовки и транспортировки), позволяя в той или иной мере компенсировать падающее в результате отбора пластовое давление.

В итоге за последние два десятилетия происходит постепенная переориентация аптальб-сеноманского водоносного комплекса из источника подземных вод в резервуархранилище. Нередко на месторождениях возникает ситуация, когда эксплуатируются и водозаборные узлы, и участки сброса попутно добываемых вод, что объясняется технологическими и экономическими решениями недропользователя. Благодаря своему простому геологическому строению и емкостно-фильтрационным характеристикам, ААС ВК позволяет одновременно испытывать на себе столь кардинально отличные друг от друга техногенные воздействия. Опыт исследований авторов позволяет утверждать, что совместная

работа водозаборов и пунктов закачки на ближайших друг к другу лицензионных участках сглаживает ситуацию по резкому изменению уровенного режима за счет так называемой взаимной компенсации.

В качестве вывода хочется отметить важность оценки влияния на апт-альб-сеноманский комплекс добычи подземных вод и углеводородов, закачки излишков попутных флюидов по результатам гидрогеологического мониторинга недр. Данные мониторинговых исследований позволяют контролировать уровенный режим водоносного комплекса и качественный состав подземных вод, решая определенные задачи недропользования в рамках правового поля.

- 1. Гидрогеология СССР. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / Под ред. В.А. Нуднера, Ю.К. Миронова, Б.П. Ставицкого и др. М.: Недра, 1970. Т. 16. 368 с.
- 2. Матусевич В.М. Краткая история изучения глубоких подземных вод Западно-Сибирского мегабассейна и эволюция научных представлений // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 1999. № 4. С. 24—31.
- 3. Курчиков А.Р., Саитов В.А., Павленко О.Л., Хасанов Д.А. Глубинное захоронение пульпообразных буровых отходов экологически безопасный вид недропользования // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России: XXI Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием. 22–28 июня 2015. Якутск, 2015. С. 478–482.

# ТЕРМАЛЬНЫЕ ВОДЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ МОНГОЛИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-106-110

Сурмаажав Д.

Корпорация «Монгол Ус», Улан-Батор, Монголия, surmaajavdamdin@yahoo.com

Аннотация. Изложенное обобщение исследований в Центральной Монголии связано с определением особенностей проявлений термальных вод Хангайского сводного поднятия, изучением вопросов происхождения и условий их распространения. Автором собраны данные по термальным водам Хангая, касающиеся геолого-гидрогеологических и гидрогеохимических аспектов, проведено районирование Центральной Монголии по геолого-структурному принципу с выделением гидрогеологических районов. Изучены структурно-тектонические, гидрогеологические, геотермические и газовые условия Хангайской гидротермальной системы Центральной Монголии, проведена оценка запасов термальных вод по некоторым месторождениям гидротерм. Исследования основных гидрогеологических структур Хангая, условий формирования источников и месторождений термальных вод положены в основу оценки теплоэнергетических ресурсов страны, которая выполнена впервые и имеет важнейшее народно-хозяйственное значение. Обоснованы перспективы расширения направлений использования трещинно-жильных термальных вод.

**Ключевые слова:** термальные воды, тектонические структуры, обводненные разломы, источники, теплоэнергетические ресурсы.

Abstract. The stated generalisation of the study in Central Mongolia is associated with the identification of the features of the manifestations of the thermal waters of the Khangai composite uplift, the study of the origin and conditions of their distribution. The author has collected data on the thermal waters of the Khangai, concerning the geological-hydrogeological and hydrogeochemical aspects, zoning of Central Mongolia was carried out according to the geological-structural principle with the identification of hydrogeological regions. The structural-tectonic, hydrogeological, geothermal and gas conditions of the Khangai hydrothermal system of Central Mongolia have been studied, and the thermal water reserves have been estimated for some of the hydrothermal deposits. Studies of the main hydrogeological structures of Khangai, the conditions for the formation of sources and deposits of thermal waters form the basis for the assessment of the country's heat and power resources, which was carried out for the first time and has national and economic importance. Prospects for expanding the use of fractured-vein thermal waters have been substantiated.

Key words: thermal waters, tectonic structures, flooded faults, springs, thermal energy resources.

Трещинно-жильные термальные воды издавна привлекали к себе внимание необычными свойствами, особенностями распространения, химическим и газовым составом, иногда высокой температурой, нередко значительными дебитами родников. Проявления такого типа водных растворов установлены во многих странах, и в частности в Центральной Монголии [2, 3]. Термальные воды относятся к категории ценных и распространенных минеральных вод, на базе которых создаются курорты, санатории, пансионаты, а также являются источником подземного тепла при экономически выгодных показателях их использования. Глубокое изучение всех вопросов, связанных с распространением гидротерм на территории Центральной Монголии и условиями их формирования, не только представляет практический интерес, но и имеет важное теоретическое значение.

Формирование месторождения термальных вод – весьма сложный процесс, определяющийся многими факторами, часто накладывающимися друг на друга. Изучением проблемы формирования и генезиса гидротерм, их распространения в различных геологогидрогеологических и геотермических обстановках занимались в разное время многие ученые. По наличию и качеству разнообразных минеральных и термальных источников территория Хангайского неотектонического поднятия не уступает другим регионам Мира. Монголия, обладая обширными геотермальными ресурсами, практически их не использует, так как эти природные богатства изучены и оценены недостаточно. На данной территории были выявлены многочисленные источники и месторождения термальных вод, такие как Хужирт, Шивэрт, Шаргалжуут, Хульж и др. До настоящего времени остается ряд нерешенных вопросов, в частности особенности происхождения, формирования и распределения термальных вод в гидрогеологических структурах Монголии, поэтому на структурно-гидрогеологического основе анализа автором выделены основные

гидрогеологические структуры и особенно обводненные разломы с присущими им гидротермами [5].

Территория Центральной Монголии представляет собою типичную горную область. Максимальная абсолютная высота гор Хангая составляет 4031 м, однако большая часть вершин имеет высоту 2000—3800 абс. м. В геологическом строении Хангайского сводового поднятия принимает участие комплекс осадочных и магматических пород, а также относительно большее распространение имеют кристаллические сланцы, известняки и гранитогнейсы древнепалеозойских и докембрийских пород. На данной территории широко распространены кайнозойские, в большинстве случаев четвертичные, базальты, связанные с центральными и трещинными излияниями лав. Четвертичные отложения генетически представлены ледниковыми и озерно-аллювиальными типами осадков.

Складчатые сооружения Монголии были сформированы в различные периоды палеозойской эры, котя немаловажная роль в их формировании принадлежит также и более древним докембрийским и более молодым мезозойским тектоническим подвижкам. Тектоника страны характеризуется сложным глыбовым, мозаичным строением, обусловленным сочетанием разноориентированных структурных элементов, часто ограниченных сетью пересекающихся разломов ортогональной или диагональной ориентировки. Отметим, что разрывные нарушения для решения гидрогеологических задач можно разделить на глубинные, региональные (структурообразующие) и локальные (обводненные).

Благодаря структурно-гидрогеологическому анализу установлено, что узлы пересечения структурообразующих (глубинных) с глубокими (приповерхностными) разломами сопровождаются на земной поверхности выходами источников с термальными водами. Эти участки сопряжений разноранговых тектонических дислокаций, приуроченных к сейсмически активным районам, связаны с новейшими тектоническими движениями. Районы распространения месторождений термальных вод в глубоких разломах расположены в центральной и северо-западной части Монголии. Подавляющее большинство месторождений термальных вод приурочено к глубоким разломам северо-западного простирания, либо к участкам пересечения северо-западных структур с разрывами северовосточного направления.

Особенностью неотектоники Центральной Монголии является наличие глубоких радиальных разломов, возникших в результате действия сил растяжения под влиянием интенсивного общего сводового поднятия этой огромной территории, особенно в конце третичного – в начале четвертичного времени. В процессе дальнейшего тектонического развития данной области появлялись новые разломы, а некоторые из более древних разломов неоднократно подновлялись. Отзвуки активных тектонических движений отмечаются и в современную эпоху, о чем свидетельствует ежегодно происходящие на этой территории землетрясения, иногда катастрофического характера.

Гидрогеологическое районирование Центральной Монголии произведено по геологоструктурному принципу для аналогичного разделения смежной к северу и востоку территории страны. Выделение гидрогеологических районов в регионе выполнено на основе морфоструктурной схемы. Рассматриваемая территория расположена в пределах двух крупных гидрогеологических регионов — Северного и Южного, соответствующих одноименным тектоническим мегаблокам. Гидрогеологические районы подразделяются на гидрогеологические районы первого порядка: в Северном регионе их три, в Южном — два. Районы первого порядка отвечают одноименным складчатым системам, которые сформировались в разные эпохи складкообразования. Районы первого порядка имеют сложное строение, в них выделяются более мелкие районы второго порядка — гидрогеологические массивы, адмассивы, адбассейны, вулканогенные супербассейны и артезианские бассейны.

Образование всех перечисленных структур Монголии происходило в различные геологические эпохи, но наиболее широко распространенными являются гидрогеологические массивы, сложенные протерозойскими, палеозойскими и интрузивными комплексами. Все

остальные структурные подразделения имеют наложенный характер, наиболее типичными из которых являются молодые впадины, выполненные мезозойскими и кайнозойскими осадками — артезианские бассейны. Систематизация гидрогеологических структур Центральной Монголии является исходным положением для построения геолого-структурных моделей месторождений термальных вод, определения граничных условий, выбора оптимальных и расчетных схем для оценки запасов, а также ресурсов гидротерм.

На основе структурно-гидрогеологического районирования Хангайского сводового поднятия в Центральной Монголии автором выделено три типа гидрогеологических структур, различающихся условиями формирования и распределения подземных вод: гидрогеологические массивы и бассейны, а также обводненные разломы. Глубокие обводненные разломы, как и приповерхностные разрывные дислокации, являются в основном структурами поперечными. Они оперяют глубинные и региональные разломы, тектоническая активность которых возобновилась на современном этапе. На территории Центральной Монголии глубокие дизьюнктивные структуры проявляются многочисленными выходами термальных источников, которые объединяют месторождения гидротерм в Хангайскую гидротермальную систему. Ведущая роль в формировании современных гидротерм, выводимых на дневную поверхность по зонам дробления обводненных разломов, принадлежит рифтогенному геодинамическому режиму развития Хангая.

В рассматриваемом регионе известны многочисленные проявления термальных вод, которые представлены азотными термальными, холодными углекислыми и радоновыми водами, а также азотными, метановыми солеными водами и рассолами. Северную часть рассматриваемого региона занимает провинция азотных термальных вод, центральную и южную – провинция азотных, метановых соленых вод и рассолов, в северо-восточной части небольшая территория относится к провинции углекислых холодных вод. В газовом составе всех типов термальных вод преобладает азот (79.5–91.5 %, об.), присутствуют растворенный сероводород, концентрация которого изменяется от 1.0 до 16.7 мг/дм<sup>3</sup>, и кремнезем, в количестве, превышающем бальнеологическую норму. Для гидротерм характерны повышенные содержания также аргона и гелия [4].

При прогнозной оценке исследуемой территории на возможные проявления термальных вод большое значение имеет корректное использование структурнотектонических, гидрогеологических и других критериев (признаков), используемых для характеристики общих закономерностей формирования и обоснования возможности обнаружения выходов или месторождений термальных вод. Анализ распределения подземных вод в гидрогеологических структурах Монголии свидетельствует о том, что их наиболее крупные скопления формируются в пределах бассейнов и обводненных разломов. При этом в зонах дробления приповерхностных разломов локализуются, как правило, холодные пресные подземные воды; для трещинно-жильных вод глубоких разломов характерна повышенная температура, специфический состав, а также низкая минерализация, поэтому поисковыми признаками проявлений трещинно-жильных термальных вод и локализации месторождений гидротерм следует считать комплекс поисковых критериев благоприятных участков (зон), включающий сейсмические, литологические, структурно-тектонические, гидрогеотермические, геоморфологические, магматические, криогенные, геофизические, гидрогеохимические признаки.

Геотермальные системы Центральной Монголии характеризуются повышенными тепловыми потоками, обусловленными как локальными скоплениями термальной воды в земных недрах, так и равномерным прогревом горных пород на больших площадях [1]. В первом случае в переносе избыточного глубинного тепла основную роль играет конвекция, а во втором — теплопроводность (кондукция). Горячие источники со свойственной газовой составляющей представляют собой поверхностные проявления гидротермальных систем. Установлено, что под районами Центральной Монголии в верхней мантии сконцентрирован малоплотный и аномально нагретый материал. С областью разуплотнения мантии пространственно и генетически связаны излияния базальтов в неоген-четвертичное время.

Наиболее молодые базальты приурочены к оси Хангайского сводового поднятия. В этой зоне сконцентрировано большое количество термальных источников с температурой 35-86 °C и содержанием He=0.25-1.00 % .

Пространственно очаги разгрузки гидротермальных систем Монголии находятся в районах проявлений четвертичного щелочного вулканизма Прихубсугулья и Северного Хангая, а также в области известково-щелочного вулканизма Хэнтэя. Высказанное предположение о дополнительном тепловом питании вполне обосновано [7]. Подтверждением этого является повышение изотопного отношения гелия в пробах газа, отобранных из источников, приуроченных к районам развития четвертичного вулканизма. Максимальные отношения  $^{3}He/^{4}He = 10^{-5}$ , определенные в газах, отражают примесь первичного He, сохранившегося в подкоровых геосферах, и являются прямым индикатором современной тепломассопотока из мантии в земную кору. Проведена оценка основных показателей гидротермальных систем Центральной Монголии, в частности по кремниевому и катионным геотермометрам. Значения глубинных температур (46–128 °C), полученные Si-геотермометром, позволили выделить наиболее перспективные участки вне зависимости от природы возникновения тепловой аномалии. Ими на территории Хангая оказались месторождения термальных вод Шивэрт, Чулуут, Хуйтэн, Хужирт, Хурэмт, Хульж и др.

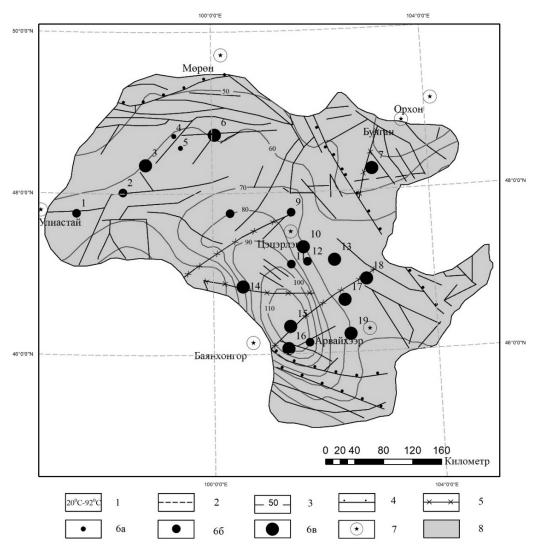
Температура подземных вод за пределами районов современной вулканической деятельности остается важнейшим критерием глубины проникновения метеогенных вод в открытые каналы разрывных дислокаций. Для оценки глубинных температур применена методика, использующая данные о химическом составе гидротерм. Теоретически и экспериментально установлена зависимость концентрации кремнезема и соотношения ряда щелочных металлов от температуры термальных источников, позволяющая по концентрации того или иного компонента оценить температуру на глубине формирования гидротерм.

Ресурсная база проявлений термальных вод и основных месторождений Центральной Монголии состоит их характерных представителей группы гидрокарбонатных натриевых вод, в частности, месторождения Хужирт и Шаргалжуут, на базе которых функционируют санатории местного и республиканского значения. Отметим, что эксплуатационные запасы месторождения термальных вод Хужирт, рассчитанные по категориям А+В+С, достигают 1742.4 м³/сут. А суммарный дебит горячих источников месторождения Шаргалжуут с температурой воды 48–90 °C составляет 51 л/с. Здесь на участке площадью 0.25 км² имеется более 80 источников с температурой воды выше 40 °C. Представителями группы сульфатных натриевых гидротерм являются такие месторождения, как Сайхан Хульж и Отгонтэнгэр, на базе которых существуют курорты также республиканского значения. Установлено, что термальные воды Отгонтэнгэр приурочены к зоне тектонического дробления интрузивных пород, а их разгрузка связана с оперяющими и поперечными трещинами разного направления. В пределах месторождения выявлены 40 горячих выходов с температурой 28–55 °C.

В настоящее время низко- и среднепотенциальные теплоэнергетические воды Хангая для теплоснабжения промышленных, сельскохозяйственных, гражданских объектов используются в незначительных объемах. Ранее теплоснабжение в стране на базе термальных вод развивалось в основном путем создания мелких объектов отопления, горячего водоснабжения и бальнеологии. Отметим, что к теплоэнергетическим ресурсам относятся подземные воды с температурой более 35 °C, независимо от их химического состава. Распределение термальных вод в центральной части Монголии показано на рисунке.

Для уточнения потенциала тепловых ресурсов термальных вод Центральной Монголии произведен расчет суммарно возможной выработки тепла. Естественные ресурсы термальных вод на территории Хангайского сводового поднятия выражаются величиной 17044 м³/сут, что можно представить в виде 1880.9 ГДж/сут энергетического потенциала [6]. Значения глубинных температур, полученных геотермометром, позволили выделить наиболее перспективные участки вне зависимости от природы возникновения тепловой аномалии. Оцененный тепловой поток гидротерм Хангайской гидротермальной системы в дальнейшем

позволяет обеспечить значительное расширение практического использования гидроминеральной и теплоэнергетической составляющей природных ресурсов страны.



Карта распространения термальных вод Хангайской гидротермальной системы. I — диапазон температур; 2 — граница аймака; 3 — изолиния подземного теплого потока мВт/м $^2$  (по Р.П. Дорофеевой, 1992); 4 — структурообразующие разломы; 5 — обводненные разломы; естественные дебиты, (л/с): 6a — (меньше 1), 66 — (1–5), 6a — (5–25); 7 — центр аймака; 8 — область распространения термальных вод.

- 1. Геншафт Ю.С., Салтыковский А.Я. О глубинном строении Монголии // Эволюция геологических процессов и металлогения Монголии. М.: Наука, 1990. С. 177–181.
- 2. Геохимия подземных минеральных вод МНР / Е.В. Пиннекер, Б.И. Писарский, П. Доржсурен и др. М.: Наука, 1976. 79 с.
- 3. Маринов Н.А., Попов В.А. Гидрогеология Монгольской Народной Республики, М.: Гостехиздат, 1963. 451 с.
- 4. Писарский Б.И., Ганчимэг. Д. Газовый состав подземных минеральных вод. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. 106 с.
- 5. Сурмаажав Д. Особенности проявлений термальных вод Хангайского сводового поднятия (Монголия) // Науки о Земле и недропользование. Т. 42. 2019. № 4. С. 529–538.
- 6. Сурмаажав Д. Теплоэнергетические ресурсы термальных вод Центральной Монголии // Успехи современного естествознания. 2020. № 9. С. 106−112.
- 7. Тепловой режим недр МНР / М.Д. Хуторской, В.А. Голубев, С.В. Козловцева и др. М.: Наука, 1991. 126 с.

# ТЕКТОНИЧЕСКАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ ПАЛЕОЗОЙСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КУЗБАССА И ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-111-115

Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Лукьянов А.Е., Сурганов С.В. Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, tagiltsev@k66.ru

Аннотация. На территории Кузбасса и Восточного Донбасса проанализированы структура и фильтрационные свойства трещинного водоносного комплекса до глубины 600–1000 м. Выявлена вертикальная анизотропия фильтрационных свойств терригенных отложений. Установлено, что распределение проницаемых зон в разрезе носит закономерный характер, не имеющий тесной связи с литологическим составом горных пород. Отмечены общие закономерности в формировании фильтрационной структуры породных массивов угленосных бассейнов и вертикальной трещинной зональности скальных массивов Уральского региона. Установлено, что фильтрационное расслоение разреза терригенных отложений определяется полем тектонических напряжений.

**Ключевые слова:** вертикальная фильтрационная стратификация, тектонические напряжения, гидродинамические параметры, напоры подземных вод, напряженно-деформированное состояние.

Abstract. On the territory of the mountain-folded Kuzbass and Eastern Donbass, the structure and filtration properties of the fractured aquifer complex to a depth of 600 - 1000 m were analyzed. The vertical anisotropy of the filtration properties of terrigenous deposits is revealed. It is established that the distribution of permeable zones in the section has a regular character, which does not have a close connection with the lithological composition of rocks. The general regularities in the formation of the filtration structure of rock massifs of coal-bearing basins and vertical crack zonation of rock massifs.

**Keywords:** vertical filtration stratification, tectonic stresses, hydrodynamic parameters, groundwater head, stress-strain state.

Массивы палеозойских горных пород сформировались в процессе длительной геологической истории. Первичные коллекторские свойства интрузивных, эффузивноосадочных и терригенных пород в горно-складчатых регионах в ходе длительного геологического развития были в значительной степени или практически полностью утрачены и возникли вновь в приповерхностной части земной коры в виде зон открытых трещин [1]. Подземные воды в скальных массивах приурочены к зонам открытых трещин, а водообильность породных массивов зависит от количества и раскрытия трещин. Мощность зоны приповерхностной трещиноватости связана главным образом с составом пород и составляет обычно несколько сотен метров [2]. Традиционно считается, что региональная зона приповерхностных открытых трещин образовалась под влиянием процессов физикохимического выветривания, ктох многочисленные факты противоречат представлениям.

Детальные исследования, включающие изучение распределения по глубине фильтрационных свойств, напоров, трещин, химического состава и геомеханических характеристик пород, выполненные на ряде объектов Урала и других регионов, позволили уточнить структуру и генезис зон приповерхностных открытых трещин. Анализ фактических данных показал, что в скальных массивах наблюдается четко выраженная фильтрационная стратификация. Водоносный комплекс приповерхностной трещиноватости мощностью 300-600 м и более состоит из ряда чередующихся водоносных и водоупорных горизонтов [2-4]. Результаты работ и теоретические проработки позволяют считать, что выветривание выполняет подчинённую роль в формировании приповерхностных зон открытых трещин. Главную роль в формировании приповерхностного водоносного комплекса играют современные тектонические процессы, которые в массивах горных пород развиваются под воздействием значительных горизонтальных напряжений, существующих приповерхностной части земной коры. Напряженно-деформированное состояние (НДС) предопределяет развитие массовой современной коры тектонической трещиноватости на глубину до 500 м и более от поверхности земли [3–5].

В регионах, где угольные месторождения связаны с палеозойскими горными породами (Кузбасс, Донбасс), были выявлены особенности гидрогеологической

стратификации разреза, близкие к закономерностям интрузивных и эффузивно-осадочных массивов горно-складчатых областей. Анализ этих данных позволяет считать, что формирование гидрогеологической стратификации в терригенных разрезах палеозойских горных пород, наряду с литологическими факторами, определяется воздействием тектонических напряжений [6].

Напряженное состояние массивов горных пород в тех регионах, где изучалось НДС верхней части земной коры, характеризуется тем, что максимальное сжимающее напряжение ориентировано горизонтально и в несколько раз по своему значению превышает литостатическое давление. Горизонтальное сжатие земной коры создает условия для деформирования ее части, прилегающей к земной поверхности, и установления в этой зоне предельно напряженного состояния в массивах горных пород. В условиях предельно напряженного состояния в приповерхностной зоне земной коры происходит хрупкая деформация горных пород с образованием сети взаимосвязанных трещин. Именно эти трещины играют основную роль в формировании региональной зоны приповерхностной трещиноватости и, соответственно, приповерхностного водоносного комплекса в скальных массивах. На определенной глубине происходит смена хрупкого состояния массива горных пород на промежуточное (переходное к пластичному) состояние [5–7]. Ниже этой глубины взаимосвязанная трещиноватость отсутствует и происходит образование только локальных зон тектонических нарушений. Данная глубина отражает положение регионального водоупора.

На основе геомеханической модели поведения массива горных пород в поле разработаны представления напряжений формировании приповерхностной трещиноватости [4, 5]. Вес столба горных пород в приповерхностной части земной коры играет роль минимального главного напряжения. По мере нарастания значение литостатического давления нарастает и соотношение максимальным (горизонтальным) и минимальным (вертикальным) напряжением изменяется. В этих условиях геомеханическое состояние приповерхностной зоны хрупкой деформации описывается аналитическими зависимостями, опирающимися на линейный критерий предельного состояния (закон Кулона). На основании представлений о пределах применимости закона Кулона (для описания хрупкой деформации) выведены зависимости, позволяющие рассчитывать положение нижней границы зоны хрупкой деформации (глубину до регионального водоупора). Сравнительный анализ результатов теоретических расчетов и фактических данных по ряду объектов, расположенных на Урале, Кузбассе и Донбассе, показал их хорошее соответствие [5, 7].

Наряду с общим соответствием зоны приповерхностной трещиноватости (зоны хрупкой деформации) и приповерхностных водоносных образований, детальный анализ фактических материалов позволил выявить ряд особенностей и интересных закономерностей в фильтрационной структуре всей зоны. В целом выявилось сложное строение приповерхностной зоны трещиноватости, которое, в свою очередь, определяет формирование системы водоносных и относительно водоупорных горизонтов, имеющих региональное распространение (таблица).

В гидрогеологическом разрезе Кузбасса и Восточного Донбасса, сверху вниз, можно выделить несколько основных водоносных гидрогеологических подразделений (горизонтов). Эти горизонты различаются по гидрогеологическим характеристикам. Гидрогеологические характеристики отражают величину показателей фильтрации, водоотдачи, напора и химического состава подземных вод.

Первый от поверхности водоносный горизонт с геомеханических позиций является зоной разгрузки тектонических напряжений вблизи поверхности земли. Зона разгрузки обычно подвержена воздействию процессов выветривания, поэтому этот горизонт авторами производственных отчетов чаще всего рассматривается как водоносный горизонт зоны выветривания (таблица). Средняя мощность этого горизонта в осадочных регионах составляет 100 м. Образование зоны разгрузки связано с нарушением целостности

породного массива под влиянием горизонтальных тектонических напряжений. Разгрузка напряжений происходит за счет изгиба и деформации пластов в сторону свободного пространства (на поверхность земли).

В связи с разгрузкой (исчезновением) тектонических напряжений и, соответственно, отсутствием значительного силового воздействия на горные породы в зоне разгрузки количество водоносных зон, как правило, небольшое. Количество водоносных зон повышается с глубиной, по мере приближения к зоне тектонических напряжений. В свою очередь, отсутствие тектонических напряжений приводит к тому, что водоносные трещины отличаются относительно высоким раскрытием. В связи с существенным раскрытием водоносных трещин фильтрационные свойства этой зоны являются самыми высокими в гидрогеологическом разрезе. Этот горизонт можно называть зоной максимальной раскрытости трещин.

Сопоставление гидрогеологической и геомеханической стратификации

Гидрогеол. зональность	Характеристики трещиноватости	Геомеханиче зональнос	еская	Интервал глубин, м	Средняя мощн., м
Зона выветривания	Горизонт максимальной раскрытости трещин	Зона разгрузки тектон напряжен		От поверхности до 100	100
Зона активного	Горизонт интенсивной трещиноватости	Зона растягивающих вертикальных	Верхняя подзона трещин отрыва	От 100 до 200	100
водообмена	Горизонт значительной трещиноватости	напряжений, хрупкая деформация	Нижняя подзона трещин скола	От 200 до 400	200
Относительный водоупор	Горизонт минимальной трещиноватости	Зона вертикальных ней напряжен	-	370÷420	50
Зона	Горизонт средней трещиноватости	Зона сжимающих вертикальных	Верхняя подзона	От 400 до 700	300
затрудненного водообмена	Горизонт затухающей трещиноватости	напряжений, хрупкая деформация	Нижняя подзона	От 700 до 1000	400
Региональный водоупор	Отсутствие взаимосвязан. систем трещин	Хрупкопласти деформац		От 1000	-

Суммарная водопроводимость зоны разгрузки в среднем составляет несколько десятков м²/сут. В некоторых случаях суммарная водопроводимость может превышать 100 м²/сут. Коэффициент фильтрации, определенный по интервалу глубин, обычно составляет десятые доли м/сут, и в некоторых случаях может превышать 1 м/сут. Уровень подземных вод связан с рельефом местности. Химический состав подземных вод имеет тесную связь с составом поверхностных водотоков.

Второй от поверхности водоносный горизонт обычно залегает в интервале глубин от 100 до 200 м. В этой зоне активно действуют горизонтальные тектонические напряжения. Особенности формирования фильтрационного пространства связаны с постепенным развитием и увеличением количества трещин отрыва (с нижней части интервала до зоны

разгрузки). Горизонт трещин отрыва начинает формироваться тогда, когда вертикальные растягивающие напряжения начинают превышать предел прочности на разрыв для образования трещин. В большинстве регионов, в которых геологический разрез сложен терригенными породами, эта глубина составляет в среднем 200 м.

Горизонт трещин отрыва отделяется от горизонта разгрузки относительно водоупорным горизонтом. Наличие водоупора связано с резкой перестройкой поля напряжений, которая приводит к закрытию трещин. Мощность относительно водоупорного горизонта между зоной разгрузки и горизонтом трещин отрыва обычно не превышает 5—10 м. Наличие водоупора может проявляться по-разному. В некоторых случаях водоупорный горизонт практически не выявляется в процессе гидрогеологических работ. Литологическая и тектоническая неоднородность терригенных отложений нередко затрудняет выделение относительных водоупоров.

В интервале глубин от 200 до 400 м залегает водоносный горизонт, который отличается преимущественным развитием трещин скола. В целом, по этому горизонту фильтрационные свойства в 2–3 раза ниже, чем в водоносном горизонте трещин отрыва. Горизонт трещин скола можно называть горизонтом значительной трещиноватости. Между горизонтом трещин отрыва и горизонтом трещин скола нередко фиксируется относительный водоупор, имеющий среднюю мощность более 10 м. Наличие этого водоупора на глубине примерно 200 м связано с сокращением в этом интервале, вверх по разрезу, количества трещин скола и относительно слабым развитием трещин отрыва. В связи с наличием горизонтального транзита подземных вод химический состав подземных вод в этом горизонте относительно устойчивый. В соседних горизонтах нередко фиксируется наличие пестрого состава подземных вод.

Описанные выше водоносные горизонты относятся к зоне вертикальных растягивающих (эффективных) напряжений. Горизонт трещин отрыва можно называть верхней подзоной зоны растягивающих напряжений, а горизонт трещин скола — нижней подзоной. Наличие растягивающих напряжений предопределяет, что в этой части гидрогеологического разреза фиксируется относительно высокая проницаемость и существенные значения водопритоков в горные выработки. Высокие значения водопритоков также определяются тем, что, несмотря на наличие относительных водоупоров, горизонты зоны растягивающих напряжений и горизонт зоны разгрузки имеют относительно хорошую связь между собой и с дневной поверхностью. Важно отметить, что именно зона вертикальных растягивающих напряжений предопределяет хорошую циркуляцию подземных вод и формирует зону активного водообмена.

В интервале глубин около 400 м залегает водоупорный слой, образование которого связано с наличием зоны нейтральных вертикальных напряжений. Выше этой зоны развиваются растягивающие вертикальные напряжения, а ниже этой зоны формируются сжимающие эффективные вертикальные напряжения. Эффективные нейтральные напряжения предопределяют низкую, практически нулевую, величину вертикальных деформаций. В свою очередь, отсутствие вертикальных деформаций влечет за собой значительное снижение интенсивности процессов образования и раскрытия трещин. Во многих случаях слой нейтральных напряжений можно рассматривать как хорошо выраженный водоупорный горизонт. Слоистая неоднородность терригенных отложений предопределяет неоднородность геомеханических свойств породных пластов, что затрудняет выделение зоны (слоя) условных нейтральных вертикальных напряжений.

Ниже глубин 350–450 м развиваются эффективные вертикальные сжимающие напряжения. Зона сжимающих напряжений в приповерхностной части зоны хрупкой деформации имеет мощность около 600 м и залегает в интервале глубин от 400 до 1000 м. Водопроводимость зоны сжимающих напряжений находится на уровне единиц м<sup>2</sup>/сут. Напор подземных вод в этой зоне, как правило, несколько выше, чем фиксируется в основном дренирующем водоносном горизонте.

Зоны разгрузки растягивающих и сжимающих напряжений являются

структурными подразделениями этажа (зоны) хрупкой деформации земной коры. В зоне хрупкой деформации развиваются системы взаимосвязанных трещин и формируются регионально выдержанные водоносные горизонты.

Фильтрационные свойства горных пород, которые находятся ниже зоны хрупкой деформации, обычно низкие и очень зависят от литологического состава горных пород. Если осадочные (терригенные) горные породы сохраняют, в какой-то мере, первичную пористость, то детальные исследования фиксируют определенный уровень проницаемости. В скальных породах эту часть геологического разреза можно рассматривать как обладающую водоупорными свойствами. При наличии тектонических разломов могут фиксироваться значительные величины фильтрационных показателей, которые связаны с локальными нарушениями.

Таким образом, в гидрогеологическом разрезе палеозойских терригенных отложений обычно можно выделить несколько регионально выдержанных водоносных горизонтов, которые отличаются по фильтрационным свойствам, величине напора подземных вод, а также разделяются между собой относительно водоупорными горизонтами.

#### Выводы

- 1. Фильтрационные свойства скальных терригенных пород связаны преимущественно с наличием открытых проницаемых трещин. Подземные воды терригенной толщи в верхней части гидрогеологического разреза, до глубины 600–1000 м, формируют трещинный водоносный комплекс. Вертикальная структура водоносного комплекса не имеет очень тесной связи с литологическим составом пород и практически не зависит от геологической слоистости.
- 2. Открытые проницаемые трещины в палеозойских породах рассматриваются как результат деформации скальных массивов под воздействием современных тектонических сил. Закономерное изменение количества проницаемых трещин в разрезе объясняется и обосновывается на основе аналитических зависимостей, описывающих изменение напряженного состояния массивов горных пород с глубиной [2–7]. Приповерхностная зона проницаемых трещин, мощностью 600–1000 м и более, рассматривается как зона хрупкой деформации земной коры.
- 3. Следует предполагать, что гидрогеологическая и геомеханическая ситуация в регионах, где геологический разрез сложен терригенными образованиями палеозойского возраста, в значительной степени аналогична условиям, которые наблюдаются в горноскладчатых регионах. Гидрогеомеханические представления фильтрационной стратификации геологического разреза тозволяют целенаправленно проводить работы гидрогеологические ДЛЯ решения залач водоснабжения захоронения промышленных стоков.

- 1. Антыпко Б.Е. Гидрогеологические ёмкости горно-складчатых областей. М.: Недра, 1986. 185 с.
- 2. Тагильцев С.Н. Геомеханические основы гидрогеологической стратификации скальных массивов Урала // Изв. вузов. Горный журнал. 1995. № 5. С. 75–79.
- 3. Тагильцев С.Н., Лукьянов А.Е. Гидрогеологические признаки тектонической стратификации скального массива // Инженерная геология. 2009. № 1. С. 60–64.
- 4. Тагильцев С.Н., Лукьянов А.Е. Гидрогеологическое расслоение скального массива в условиях современного напряженного состояния // Литосфера. 2010. № 2. С. 122–129
- 5. Тагильцев С.Н. Границы применимости линейного критерия предельно напряженного состояния горных пород. // Изв. вузов. Горный журнал. 2015. № 3. С. 24–30.
- 6. Тагильцев С.Н., Стеценко О.П., Лукьянов А.Е. Вертикальная фильтрационная зональность угленосных отложений Кузбасса // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы XXI Всерос. совещ. по подземным водам Востока России. (г. Якутск, 22-28 июня 2015 г.). Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 2015. С. 325–330.
- 7. Тагильцев С.Н. Определение геомеханических характеристик на основе изучения трещинной и фильтрационной стратификации скальных массивов // Изв. вузов. Горный журнал. 2016. № 7. С. 49–56.

# ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ИРТЫШ-ОБСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-116-121

Трифонов Н.С., Колубаева Ю.В., Иванова И.С.

Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО PAH, Томск, Trifonovnik@mail.ru

Аннотация. В работе рассматриваются гидрогеологические условия северной части Иртыш-Обского артезианского бассейна. В пределах исследуемого региона развиты два водоносных комплекса: плиоценчетвертичный и верхнемеловой – миоценовый. Приводятся краткие сведения по химическому составу вод и водообильности отложений гидрогеологических подразделений. Показано, что подземные воды верхней гидродинамической зоны имеют преимущественно гидрокарбонатный кальциевый состав, который сменяется на гидрокарбонатный натриевый ниже зоны развития многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: подземные воды, водоносный горизонт, водообильность, водоснабжение.

**Abstract.** The paper considers the hydrogeological conditions of the northern part of the Irtysh-Ob artesian basin (the central part of the Khanty-Mansiysk Autonomous District). Two aquifers occur in the study region: Pliocene-Quaternary and Upper Cretaceous-Miocene. Brief information on the chemical composition of waters and water abundance in the deposits of hydrogeological units is represented in the paper. It is shown, the underground waters of the upper hydrodynamic zone have predominantly hidrocarbonate calcium composition, replaced by hydrocarbonate sodium below the zone of permafrost rocks occurrence.

**Key words:** groundwater, aquifer, water availability, water supply.

Административно северная часть Обь-Иртышского артезианского бассейна расположена в центре Ханты-Мансийского автономного округа. Водоснабжение населения на данной территории осуществляется за счет подземных вод, при этом существуют проблемы, связанные с тем, что используемые воды характеризуются содержанием некоторых компонентов химического состава, превышающим нормы ПДК [1]. В этой связи актуальным является рассмотрение гидрогеологических условий и гидрогеохимических особенностей подземных вод верхней гидродинамической зоны в пределах исследуемой территории с целью оценки возможности их использования.

В гидрогеологическом отношении объект исследований приурочен к северной части Иртыш-Обского артезианского бассейна, входящего в состав Западно-Сибирского сложного артезианского бассейна [2]. В разрезе мезозойско-кайнозойского чехла данного бассейна мощностью от 2.5 до 5.0 км выделяются два гидрогеологических этажа: мезозойско-кайнозойский и мезозойский, разделенные толщей глинистых пород туронско-приабонского возраста, являющихся региональным водоупором. Поскольку основная цель исследований — изучение гидрогеологических особенностей верхней гидродинамической зоны, характеристика подразделений нижнего мезозойского гидрогеологического этажа (MZ) не приводится. Гидрогеологическая стратификация разреза проведена согласно [3].

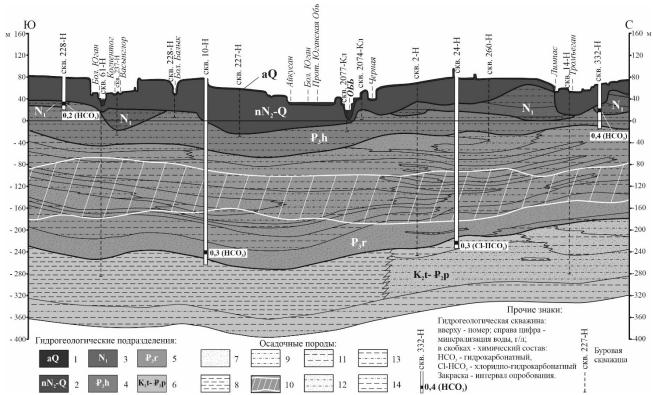
Мезозойско-кайнозойский гидрогеологический этаж (MZ-KZ) включает сложно переслаивающиеся плиоцен-четвертичные отложения и подстилающие их толщи миоцена и палеогена. В его основании залегают туронско-приабонские глины. В пределах исследуемого региона развиты два водоносных комплекса: плиоцен-четвертичный  $(N_2-Q)$  и верхнемеловой – миоценовый  $(K_2-N_1)$  (рисунок).

Плиоцен-четвертичный водоносный комплекс делится на два горизонта: четвертичный аллювиальный (aO) и плиоцен-четвертичный полигенетический  $(nN_2-O)$ .

Четвертичный аллювиальный водоносный горизонт (aQ) приурочен к аллювиальным отложениям пойм, первых и вторых надпойменных террас крупных рек. Горизонт залегает первым от поверхности. Водовмещающие отложения представлены преимущественно мелко- и среднезернистыми, реже крупнозернистыми песками с гравием и галькой, в кровле горизонта отмечаются линзы и прослои суглинков и супесей. Общая мощность горизонта от нескольких метров в долинах притоков до 40 м в долинах крупных рек.

Воды горизонта безнапорные. Глубина залегания уровня грунтовых вод изменяется от

0.4 до 2.5 м. Фильтрационные свойства водовмещающих отложений характеризуются коэффициентом фильтрации 1.8–12.0 м/сут. Водообильность горизонта неравномерна и зависит от литологического состава водовмещающих отложений. Дебиты скважин изменяются от десятых долей до 1.0 л/с при понижениях уровня 1.0–1.6 м. Удельные дебиты – от 0.025 до 1.0 л/с. Питание водоносного горизонта происходит главным образом за счет инфильтрации атмосферных осадков, паводковых речных вод. Разгрузка осуществляется в долины и русла рек. Режим водоносного горизонта относится к пойменной разновидности: формирование его полностью контролируется гидрологическим режимом рек.



Схематический гидрогеологический разрез района исследований (на основе геологической карты [4]). Гидрогеологические подразделения: I — четвертичный аллювиальный водоносный горизонт (песок мелко- и среднезернистый, реже песок крупнозернистый с гравием и галькой, линзы и прослои суглинков и супесей); 2 — плиоцен-четвертичный полигенетический горизонт (нерасчлененные отложения — пески, суглинки, супеси, глины, алевриты, прослои галечников); 3 — миоценовый водоносный горизонт (алевриты, глины, пески иногда, с гравием и галькой); 4 — хаттский относительно водоупорный горизонт (алевриты, глины алевритовые, прослои песков); 5 — рюпельский водоносный горизонт (пески, глины, алевриты, линзы лигнитов); 6 — туронско-приабонский водоупорный горизонт (глины с прослоями алевролитов, реже песков, конкрециями сидерита, глины опоковидные, алевритовые, опоки, прослои глауконитовых песчаников и песков). Осадочные породы: 7 — пески; 8 — глины; 9 — алевриты; 10 — многолетнемерзлые породы; 11 — переслаивание песка и глины; 12 — переслаивание песка и алеврита; 13 — переслаивание глины и алеврита; 14 — глины с примесью алеврита.

Подземные воды используются для водоснабжения населенных пунктов, расположенных вблизи рек. В связи с тем, что поверхностные воды района подвержены загрязнению, необходим строгий контроль качества подземных вод.

Плиоцен-четвертичный полигенетический горизонт  $(nN_2-Q)$  распространен практически повсеместно. Горизонт общей мощностью до 180 м (в среднем порядка 40–50 м) приурочен к озерным, аллювиальным, озерно-аллювиальным, аллювиально-морским, озерно-морским и покровным (эоловым, болотным) отложениям. Водовмещающие породы представлены суглинками, супесями, песками, глинами, торфом. Для северной и

центральной части территории характерно наличие островов многолетнемерзлых пород, приуроченных к слабодренированным участкам, сложенным суглинистыми или торфянистыми грунтами.

Воды горизонта безнапорные или с местным напором. Глубина залегания зеркала грунтовых вод изменяется от 0.0 до 12.0 м, иногда и более. Водообильность горизонта изменчива. Дебиты скважин составляют 0.01-2.90 л/с, при понижении уровня 1.0-36.0 м. Удельные дебиты скважин 0.02-1.50 л/с. Воды горизонта пресные и ультрапресные, величина минерализации 0.01-0.50 г/л. По химическому составу они гидрокарбонатные смешанные по катионам. Реакция вод от слабокислой до нейтральной (рН 6.0-7.3). Величина общей жесткости колеблется от 0.19 до 3.30 мг-экв./л.

Область питания водоносного горизонта совпадает с областью распространения. Питание происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка — посредствам родников и в гипсометрически нижележащие водоносные горизонты. Иногда открытая разгрузка происходит в береговых уступах. Водоносный горизонт эксплуатируется колодцами и скважинами для нужд мелких населенных пунктов и индивидуальных водопотребителей.

Верхнемеловой – миоценовый водоносный комплекс делится на миоценовый  $(N_l)$  и рюпельский  $(P_3r)$  водоносные горизонты (рисунок), с хаттским относительно водоупорным горизонтом  $(P_3h)$  между ними.

Миоценовый водоносный горизонт  $(N_I)$  в регионе исследований имеет широкое распространение, за исключением долин Оби, Тромъегана, где он почти полностью размыт. Стратиграфически горизонт приурочен к отложениям пелымской толщи. Водовмещающие породы представлены в основном мелкозернистыми кварцевыми песками, редко — среднезернистыми с включениями крупнозернистых. Водоупорные породы представлены переслаиванием плотных суглинков и алевритов. Среди них встречаются гравий, галька и растительные остатки, залегающие в виде пластов и линз, не выдержанных по площади, приуроченных к разным гипсометрическим уровням.

Глубина залегания кровли горизонта изменяется от 4.1 до 62.0 м, подошвы — от 13.9 до 80.0 м. Мощность горизонта колеблется от 8 до 80–100 м. Воды горизонта напорные, величина напора изменяется от 2.5 до 82.8 м. Пьезометрические уровни устанавливаются на глубине от 0.55 до 13.00 м. Водообильность высокая, дебиты скважин, вскрывших водоносный горизонт, изменяются от 0.62 до 28.10 л/с при понижении уровня соответственно от 17.80 до 14.85 м, наиболее часто получаемый дебит — 3–6 л/с. Воды описываемого горизонта используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения отдельных потребителей.

Хаттский относительно водоупорный горизонт ( $P_3h$ ) приурочен к туртасской свите. Горизонт представлен неритмичным переслаиванием алеврита плотного глинистого, зеленовато-серого и глины алевритовой темно-зеленой и зеленовато-серой с линзами белого мучнистого алеврита, местами содержащими рассеянные растительные остатки. Кровля горизонта представляет собой эродированную поверхность. Глубина ее залегания изменяется от 35 до 8120 м, абс. отм. кровли от 32 до -20 м. Максимальная глубина подошвы 120 м с абс. отм. -75 м. Минимальная глубина подошвы - до 40 м с абс. отм. -10 м. Общая мощность относительно водоупорного горизонта изменяется от 1-4 до 50-80 м.

Горизонт местами слабообводнен, удельный дебит скважин на сопредельных территориях не превышает 0.01-0.10 л/с. По величине минерализации  $(0.17-0.47\ г/л)$  воды пресные, по химическому составу гидрокарбонатные кальциево-магниевые. Практического значения для водоснабжения горизонт не имеет.

Рюпельский водоносный горизонт ( $P_3r$ ) распространен повсеместно. Глубина залегания кровли горизонта изменяется от 50 до 120 м, подошвы – от 250 до 350 м, общая мощность от 100 до 220 м. Водовмещающие породы представлены переслаиванием не выдержанных по простиранию песков преимущественно светлых, серых мелкозернистых кварцевых, с различной сортировкой; алевритов в разной степени глинистых пестроцветных

— от черных до голубовато-белых; глин от алевритистых и песчаных до тонкоотмученных, однородных. Стратиграфически горизонт объединяет отложения новомихайловской и атлымской свит и залегает на водоупорных тавдинских глинах. Последние здесь входят в состав туронско-приабонского  $(K_2t - P_2p)$  водоупорного горизонта.

Воды рюпельского водоносного горизонта напорные. Величина напора над его кровлей достигает 220 м, уменьшаясь к долинам рек до 80 м. Глубина залегания пьезометрического уровня изменяется от +4.7 до +19.5 м. Дебиты скважин изменяются в широких пределах — от 0.5 до 30.0 л/с при понижениях от 11 до 57 м. Средние удельные дебиты 0.3-0.5 л/с, иногда до 2.2 л/с. Коэффициент водопроводимости (km), определенный по данным откачек, варьируется от 57.4 до 1100.0 м²/сут. Коэффициент пьезопроводности изменяется от  $4.5 \times 10^5$  до  $1.1 \times 10^6$  м/сут.

Практически повсеместно на территории распространения рюпельского водоносного горизонта в разрезе (часто в его средней части) фиксируется реликтовая многолетняя мерзлота. Лишь в долине Оби выявляются узкие сквозные талики. Промороженный слой, общей мощностью от 20 до 110 м, можно выделить как криогенный водоупор, глубина залегания кровли которого изменяется от 100 до 200 м, подошвы – от 190 до 260 м.

Нижняя часть разреза рюпельского водоносного горизонта, лежащая под криогенным водоупором, обводнена и имеет мощность до 70 м. Воды напорные с величиной напора до 270 м. Глубина залегания пьезометрического уровня изменяется от 3 до 11 м. Водообильность этой части горизонта изучалась по результатам съемочных и поисковоразведочных работ. Дебиты скважин изменяются от 3.8 до 15.5 л/с при понижении уровня 3—11 м соответственно. Коэффициент водопроводимости (*km*) изменяется в широких пределах — от 132 до 329 м/сут, среднее значение пьезопроводности 4.59×10<sup>6</sup> м<sup>2</sup>/сут.

Практическое значение подземных вод горизонта велико. Они используются для индивидуального и централизованного водоснабжения многих городов и поселков. Водоносный горизонт, обладая достаточной водообильностью, глубиной залегания, обеспечивающей надежную изоляцию от бытового и промышленного загрязнения, значительной мощностью водовмещающих отложений и хорошим качеством, эксплуатируется многочисленными скважинами и водозаборами. Ресурсы водоносного горизонта обеспечены главным образом упругими и привлеченными запасами, формирующимися при его интенсивной эксплуатации. К этому водоносному горизонту приурочен ряд разведанных месторождений пресных вод.

Туронско-приабонский водоупорный горизонт  $(K_2t - P_2p)$  имеет повсеместное распространение на изучаемой территории, стратиграфически объединяет отложения люлинворской, талицкой свит палеогена и ганькинской, березовской и кузнецовской – верхнего мела. В южной и юго-западной части территории водоупорный горизонт наращивается сверху за счет тавдинской свиты среднего и верхнего эоцена. Водоупорные отложения представлены опоками, опоковидными глинами серыми, пепельно-серыми, желтовато-зелеными, темно-зелеными хорошо отмученными, с раковистым изломом и глинами серыми до черных, иногда алевритистыми или песчанистыми по плоскостям напластования, с четкой горизонтальной слоистостью. Глубина залегания кровли горизонта 260-350 м. Общая мощность изменяется от 352 до 809 м.

Согласно приведенной выше гидрогеологической стратификации в таблице представлена характеристика химического состава подземных вод водоносных комплексов верхнего гидрогеологического этажа. В работе использованы как личные, так и ранее опубликованные данные других авторов, полученные при проведении гидрогеологических изысканий и гидрогеохимических исследований в окрестностях с. Александровское, городов Стрежевой, Нижневартовск, Мегион, Сургут, Нефтеюганск, Ханты-Мансийск. Химический состав вод анализировался стандартными методами: титриметрия, потенциометрия, фотоколориметрия, турбидиметрия, ионная хроматография, атомно-абсорбционная спектрометрия, высокотемпературное термокаталитическое окисление.

Согласно приведенным данным (таблица), подземные воды плиоцен-четвертичного

водоносного комплекса нейтральные (pH 6.8), преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, с минерализацией от 43.0 до 539.0 мг/л. Воды характеризуются высокими содержаниями железа и марганца, а также органических веществ —  $C_{\rm opr}$  достигает 18 мг/л, при средних значениях 6.6 мг/л. В химическом составе некоторых проб встречаются высокие содержания хлора (до 160 мг/л) и натрия (до 155 мг/л), что, скорее всего, связано с подтягиванием подземных вод из верхнемелового — миоценового водоносного комплекса.

Подземные воды верхнемелового – миоценового водоносного комплекса нейтральные (pH-7.0), по химическому составу – гидрокарбонатные кальциевые или смешанного типа, с минерализацией до 600 мг/л. В нижней части комплекса в водах, залегающих ниже многолетнемерзлых пород, присутствуют воды гидрокарбонатного натриевого (содового) состава с минерализацией более  $1\ r/л$ . Так же, как и для вышезалегающего водоносного комплекса, в водах наблюдаются повышенные концентрации железа и марганца.

Химический состав подземных вод северной части Иртыш-Обского артезианского бассейна

V оминомомит	Плиоп	ен-четверт	гичный	Верхнем	ПДК <sup>3</sup>		
Компонент,	водоносн	ый компле	екс $(N_2-Q)$	водоносн			
ед. изм.	Минимум	Среднее	Максимум	Минимум	Среднее	Максимум	
рН	5.4	6.8	8.0	6.3	7.0	8.2	6–9
$OЖ^1$ , мг-экв/л	0.65	3.4	6.9	0.55	1.9	4.8	7
НСО₃⁻, мг/л	16.8	224.1	518.5	36.6	230.0	393.0	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л	0.18	7.5	48.5	0.6	1.8	13.2	500
Cl-, мг/л	0.45	17.8	160.2	2.0	18.3	531.7	350
Ca <sup>2+</sup> , мг/л	3.8	41.3	98.0	3.7	22.3	76.2	
Mg <sup>2+</sup> , мг/л	0.6	10.1	50.0	2.1	9.9	24.8	
Na <sup>+</sup> , мг/л	0.2	22.6	155.0	0.2	39.0	428.1	200
Si, мг/л	0.7	7.5	18.5	2.15	10.6	32.2	10
Сорг, мг/л	1.23	6.6	17.8	2.5	5.8	13.7	
Fe общ, мг/л	0.4	3.9	29.7	0.9	3.6	95.3	0.3
Mn, мкг/л	50	189	1200	35	183	600	100
$M^2$ , мг/л	43	214	529	123	306	1170	
Число проб		49			70		

Примечание. 1 — жесткость общая, 2 — минерализация; 3 — предельно допустимая концентрация для питьевых вод [1].

Как видно из таблицы, воды обоих комплексов в целом по основным показателям удовлетворяют требованиям СанПиН [1]. Встречаются единичные случаи отклонений от ПДК таких показателей, как  $Cl^-$ ,  $Na^+$ , Si. В отношении железа и марганца наблюдаются превышения не только по максимальным концентрациям, но и по средним значениям в десятки и даже сотни раз, что, безусловно, требует перед подачей потребителю предварительной водоподготовки по доведению содержаний железа и марганца до санитарных норм.

Таким образом, подземные воды плиоцен-четвертичного водоносного комплекса отличаются неравномерной водообильностью, которая зависит от литологического состава водовмещающих отложений. Наиболее надежным источником водоснабжения на территории северной части Иртыш-Обского артезианского бассейна являются подземные воды рюпельского водоносного горизонта  $(P_3r)$ , относящегося к верхнемеловому — миоценовому водоносному комплексу, поскольку этот горизонт обладает достаточной водообильностью, глубиной залегания и мощностью водовмещающих отложений, а также характеризуется повсеместным распространением.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 20-77-10084, часть использованных данных по химическому составу вод получена за счет средств гранта РФФИ №19-05-00290.

- 1. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации (2001). СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения (с изменениями на 2 апреля 2018 года). [online] Доступно по ссылке: http://docs.cntd.ru/document/901798042 [Дата обращения: 10.02.2021].
- 2. Создание гидрогеологической карты Российской Федерации масштаба 1:2 500 000 / Отв. ред. В.В. Куренной М.: ВСЕГИНГЕО, 2008. Приложение 17, лист 1.
- 3. Методические рекомендации по составлению карт гидрогеологического районирования масштаба 1:2 500 000, схем гидрогеологической стратификации и классификаторов объектов гидрогеологического районирования и стратификации. М., 2002.
- 4. Астапов А.П., Брадучан Ю.В., Боровский В.В., Воронин А.С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Р-43 Сургут. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. 342 с.

# МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ МОСКОВСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-122-126

# Труфанов А.И.

Вологодский государственный университет, Вологда, trufanov ai@mail.ru

**Аннотация.** В работе дано описание, распространение минеральных вод на севере Московского артезианского бассейна. Приведена краткая характеристика четырех бальнеологических групп минеральных вод – лечебных без специфических компонентов и свойств, сероводородных, железистых и бромных. Отмечается, что использование минеральных вод региона в настоящее время в качестве лечебных, лечебностоловых и купальных существенно ниже возможного. Отмечаются перспективы более широкого их освоения.

**Ключевые слова:** воды минеральные природные, железо, сероводород, бром, использование минеральных вод.

**Abstract.** The article provides a description and distribution of mineral waters in the north of the Moscow artesian basin. A brief characteristic of four balneological groups of mineral waters – medicinal without specific components and properties, hydrogen sulfide, ferruginous and bromine – is given. It is noted that the mineral waters of the region are currently used as medicinal and bathing waters significantly lower than possible. Prospects for their wider development are noted.

Key words: natural mineral waters, iron, hydrogen sulfide, bromine, use of mineral waters.

Рассматриваемая территория располагается в северной части Московского артезианского бассейна, выделяемого в пределах одноименной синеклизы Русской плиты. В соответствии с административным делением страны, это территория Вологодской области в ее современных границах. Распространение минеральных вод региона обусловлено гидрогеологическими особенностями территории, восточная часть которой разделяется на гидрогеологических этажа региональным водоупором нижнепермской гипсоангидритовой толщей. Гидрогеологические предпосылки для формирования разных типов минеральных вод определяются также и особенностями геологического строения территории. На западе отложения девона и карбона погружаются на юго-восток, перекрываясь в центре и на востоке более молодыми образованиями. В центре верхняя часть геологического разреза представлена пермскими породами, а на юге и востоке терригенными отложениями триаса. Благоприятствует формированию минеральных вод зоны интенсивного водообмена и блоковый характер строения синеклизы, подтверждаемый работами ряда авторов [1, 2]. К бортовым частям Среднерусского авлакогена, расположенного в восточной части региона, приурочены зоны тектонических нарушений, по которым высокоминерализованные воды глубоких горизонтов проникают в вышележащие водоносные горизонты, образуя в зоне активного водообмена гидрогеохимические аномалии.

В настоящей статье при характеристике минеральных вод, помимо авторских, использованы материалы гидрогеологических исследований проектных, проектно-изыскательных и других организаций, проводивших работы на данной территории для водоснабжения различных хозяйственных объектов. Кроме того, использованы материалы государственной среднемасштабной геологической съемки и другие работы. В данной работе под минеральными водами подразумеваются главным образом природные воды, которые обладают лечебными свойствами. Кроме того, минеральной принято считать воду, в которой содержание растворенных веществ составляет более 1 г/дм<sup>3</sup> [3]. В настоящее время к минеральным природным питьевым водам относят и воды с минерализацией менее 1 г/дм<sup>3</sup> [4].

На рассматриваемой территории минеральные воды имеют практически повсеместное распространение, выходят на дневную поверхность в виде источников или вскрываются буровыми скважинами. Некоторые из них хорошо известны и использовались в лечебных целях с XIX в. (например, Леденгские, Грязовецкие), на другие обратили внимание в период проведения геологической съемки территории области (например, сероводородные воды Молого-Судского междуречья). В настоящее время здесь выделяются четыре

бальнеологические группы минеральных вод – лечебные без специфических компонентов и свойств (сульфатные, сульфатно-хлоридные, хлоридные), сульфидные (сероводородные), железистые и бромные.

Воды без специфических компонентов. Геологическое строение предопределило их широкое распространение, так как в осадочном чехле бассейна выделяется гипсовоангидритовая (галогенная) толща нижнепермских пород, выполняющая роль регионального водоупора. Минеральные воды этой группы залегают выше этого водоупора и имеют различный состав (сульфатный, сульфатно-хлоридный и хлоридный) и разнообразную минерализацию. Наибольшим разнообразием среди минеральных вод без специфических компонентов пользуются сульфатные воды. Они имеют минерализацию от 2 до 4 г/дм<sup>3</sup>. Наиболее распространенными среди них являются воды краинского типа, часто встречаются кашинский, московский типы сульфатных вод. В катионном составе воды иногда преобладает ион магния (ашхабадский тип), когда гипсоносная карбонатная толща является для минеральной воды коллектором и содержит в своем составе доломиты.

Минеральную воду хлоридно-сульфатную магниево-натриевую с минерализацией 3—4 г/дм<sup>3</sup> (ижевский тип) использует профилакторий Сухонского ЦБК. Там же, в районе г. Сокола, на глубине около 200 м вскрыты сульфатно-натриевые рассолы, на уникальность состава которых обратил внимание Ю.В. Николаев [5]. Использование минеральных сульфатных и сульфатно-хлоридных вод на территории области пока незначительно, хотя функционирует ряд предприятий по розливу минеральных вод в Вологодском районе, Великом Устюге и Никольске. Запасы этих вод разведаны, утверждены и частично используются в лечебных целях в городах Тотьме, Вологде, Череповце, Соколе.

Воды хлоридного класса, приуроченные к гидрохимической зоне соленых вод с минерализацией до  $35 \text{ г/дм}^3$ , образуют аномалии среди сульфатных вод, распространение которых может быть объяснено разломной тектоникой. В подгалогенной толще развиты рассолы хлоридного натриевого состава с высоким содержанием брома.

Сульфатно-хлоридные и хлоридные воды с минерализацией менее  $35 \text{ г/дм}^3$  (ново-ижевский тип) пока не находят практического применения.

К группе минеральных вод специфического состава отнесены воды, лечебная ценность которых зависит от наличия в их составе определенных концентраций того или иного биологически активного компонента. В пределах рассматриваемой территории к этой относятся сероводородные, железистые и бромные воды. (сероводородные) минеральные воды (рисунок) – природные воды различной минерализации и ионного состава, содержащие более 10 мг/дм<sup>3</sup> общего сероводорода. На территории области они приурочены к загипсованным отложениям карбона и частично перми [6]. Наиболее широкое развитие они получили на юго-западе области в пределах Молого-Шекснинской низменности, где указанные выше породы залегают близко к поверхности земли, а местность изобилует верховыми болотами. Район распространения подземных вод с содержанием сероводорода свыше 10 мг/дм<sup>3</sup> в междуречье Мологи и Суды занимает площадь около 2 тыс. км<sup>2</sup>. Здесь отмечены выходы сульфидных вод в виде серии родников (Шелохачская группа) и на глубинах 10-30 м они вскрыты скважинами (д. Усть-Колпь, д. Елехово). Эти воды слабоминерализованные с сухим остатком до 1.1 г/дм<sup>3</sup>, сульфатногидрокарбонатные магниево-кальциевые И натриево-кальциевые с содержанием сероводорода до 54 мг/дм<sup>3</sup>. Ресурсы сероводородных вод очень велики. Удельный дебит скважин, пробуренных на глубину до 20 м, составляет 2-10 л/с. Близкими аналогами сульфидных вод Молого-Судского междуречья являются воды широкоизвестных месторождений Кемери в Прибалтике и Хилово в Новгородской области, Langehsalz в Германии (рисунок).

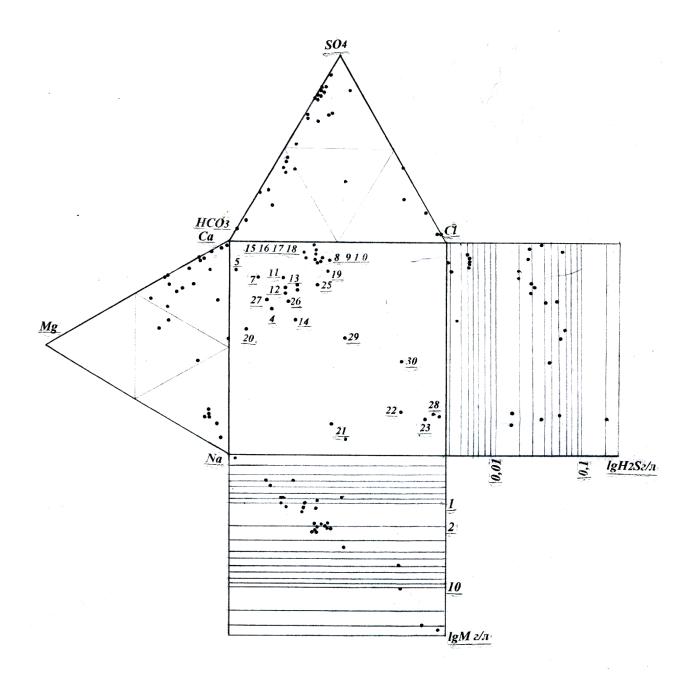


Диаграмма химического состава сероводородных вод. Цифрами на квадрате диаграммы показаны известные  $H_2$ S-источники: 4 — Куркино, 5 — Нежбуй, 7 — Сокольниково, 8 — Ладунино, 9 — Лукинское, 10 — Десятовская, 11,12,13 — Шелохач, 14 — Солунь, 15,16,17,18 — Кемери, 19 — Хилово, 20 — Назимово, 21 — Буй, 22 — Сольвычегодск, 23 — Чебоксары, 25 — Langehsalz, 28 — Серёгово, 29 — Вандыш, 30 — Мартыновская.

Большое практическое значение сульфидных вод бесспорно для создания курортной базы, поскольку они широко распространены в непосредственной близости от крупных населенных пунктов и промышленных центров области (города Череповец, Устюжна, Бабаево). Ландшафтно-климатические условия бассейнов рек Суды, Чагодощи и Колпи – большие участки живописных боров на сухой песчаной почве, наличие прекрасных пляжей, а также хорошие пути сообщения – благоприятствуют освоению месторождения, которое в настоящее время не используется. На берегу р. Шексны, в 8–10 км выше пристани «Горицы» и в 15 км от г. Кириллова, близ деревень Ладунино, Лукинской и озера Ворбозомского, известна группа сероводородных источников, которые местное население называет «сиренниками». Вокруг некоторых источников образуются значительные скопления известковых туфов. Состав воды сульфатно-кальциевый с минерализацией около 2 г/дм<sup>3</sup>.

Район отличается исключительно живописной природой в долине р. Шексны, где среди холмов расположено множество озер. Площадь распространения сероводородных источников также пригодна для санаторно-курортного освоения.

Железистые воды по условиям формирования и составу относятся к группе пресных и слабоминерализованных железистых вод и аналогичны широкоизвестным Полюстровским минеральным водам. Для отнесения воды к минеральной железистой содержание биологически активного компонента — железа — в воде должно быть не менее  $10 \text{ мг/дм}^3$  [4]. Как известно, железо необходимо для построения клеток, роста организма, переноса кислорода. Оно представляет собой основной катализатор дыхательных процессов и влияет на образование гемоглобина. В организме человека содержится около 3 г железа, из которых три четверти входит в состав гемоглобина. В многочисленных железистых источниках, широко распространенных по всей территории области, содержание железа колеблется в пределах – от 4 до 20 мг/л и более. Они имеют гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав. Кроме железа, в водах родников присутствует незначительное количество марганца, стронция, титана, радия и других элементов. На базе железистых источников в Грязовецком районе в 1930-х гг. существовал курорт в д. Талицы (в 8 км к югу от г. Грязовца), который в настоящее время не работает. Местное население использует воды железистых источников в Грязовецком (Талицкие, Нурмские, «Девять изб») и Вологодском (долина р. Лумбовец) районах в лечебных целях без медицинского контроля.

Бромные воды. Бромными считаются воды, содержащие не менее 25 мг/дм<sup>3</sup> брома при их минерализации до 10–15 г/дм<sup>3</sup>. При более высокой минерализации воды считаются бромными, если при их разбавлении пресной водой до минерализации 10–15 г/дм<sup>3</sup> содержание брома не будет ниже принятой нормы. Используются они в бальнеологии для внутреннего и наружного применения. Подземные воды с высоким содержанием брома имеют региональное распространение в пределах нижней гидрогеохимической зоны – рассолов хлоридного натриевого состава. С глубиной в соленых водах и рассолах установлено нарастание концентраций брома. В глубоких грабенах Среднерусского авлакогена и прилегающих прогибах содержание брома достигает 2.4 г/дм<sup>3</sup>. Хлоридные натриевые соленые воды и рассолы в бальнеологических целях использовались на курортах «Тотьма», «Леденгский» и используются в настоящее время в санатории-профилактории «Северстали», в с. Бобровниково близ Великого Устюга, в санатории «Новый источник» и в Вологодской водолечебнице им. В.В. Лебедева.

Анализ имеющихся материалов по проведению среднемасштабной геолого-гидрогеологической съемки территории области, а также данные поисково-разведочных и разведочно-эксплуатационных работ на пресные и минеральные воды показывают, что территория области обладает значительными гидроминеральными ресурсами.

В настоящее время на данной территории различными санаторно-оздоровительными учреждениями и линиями (заводами) розлива эксплуатируются 17 месторождений минеральных подземных вод различных типов, по шести участкам запасы утверждены Государственной или Территориальной комиссией по запасам. С учетом технических рассолов, извлекаемых из двух скважин для содержания автомобильных дорог, используется минеральных вод несколько больше утвержденных запасов. Гидрогеологические предпосылки весьма благоприятны для развития сети линий разлива минеральных и столовых питьевых вод [7].

Использование подземных минеральных вод пока в качестве питьевых лечебных, лечебно-столовых и купальных значительно ниже возможного. Большинство месторождений и проявлений минеральных вод относится к экологически чистым, благодаря природной защищенности от возможного техногенного загрязнения с поверхности. Эти особенности также должны способствовать более широкому использованию минеральных подземных вод как в качестве питьевых и лечебных в санитарно-оздоровительных учреждениях, так и для розлива.

Лечебные воды в настоящее время используются непосредственно на месторождениях

в санатории «Новый источник», в Вологодской бальнеолечебнице им. В.В. Лебедева, в санатории «Бодрость» в г. Вологде, на курорте «Тотемский», в санатории «Родник» в г. Череповце, санатории «Леденгский» в селе им. Бабушкина.

За пределами месторождений используются минеральные воды бутылочного розлива. Это минеральная вода «Вологодская», близкая по составу к лечебно-столовой московского типа, минеральные воды «Великоустюгская» и «Никольская», относящиеся к чартакскому типу лечебно-столовых вод. Кроме того, в последние годы заметен рост розлива пресных подземных вод («Серебряная Роса», «Полдарская», «100% чистая вода», «Аква-люкс», «Софийская» и др.). Перед розливом подземные воды проходят водоподготовку, поскольку естественные показатели состава разливаемых вод не удовлетворяют требованиям по качеству фасованной воды первой категории и высшей категории по содержанию бора, фтора, йода.

Подземные воды промышленного значения использовались давно. В исторических документах начиная с XIV в/ встречаются упоминания о добыче и выварке соли в окрестностях Тотьмы. Началом промышленного солеварения в Вологодской области можно считать XVI в/, когда владельцами тотьменских варниц стали известные купцы Строгановы. Солеварная промышленность активно развивалась до XVIII в. Снижение крепости рассола, жесткая конкуренция с пермскими промышленниками и промыслами на озерах Эльтон и Баскунчак привели к упадку вологодских соляных промыслов. Выварка соли в Тотьме прекратилась к концу XIX в., в Леденгске (с. им. Бабушкина) – в 1920-х годах. В некоторых районах (Верховажский, Кичменгско-Городецкий) выварка соли возобновлялась периодами вплоть до 1950-х годов.

Результаты бурения глубоких скважин, пройденных на данной территории при поисках нефти в 1950–1970-х годах, дают определенные представления о высокоминерализованных водах глубоких частей водонапорных систем. Рассолы с общей минерализацией более 50 г/дм<sup>3</sup> широко распространены в пределах северной части Московского артезианского бассейна. Они приурочены к отложениям пермской, каменноугольной, девонской, ордовикской и кембрийской систем, венда и рифея. Подземные воды этих отложений содержат бром, стронций, йод, калий, редкие металлы. Однако промышленное значение минеральных вод области на сегодня может определяться кондиционными содержаниями лишь брома (250 мг/дм<sup>3</sup>), которые отвечают глубинам залегания рассола порядка 800–1000 м.

Таким образом, изучение минеральных вод на территории севера Московской синеклизы показало их широкое распространение и большое разнообразие типов минеральных вод, что дает возможность более широкого их использования.

- 1. Демченко А.С., Демченко Б.М., Сычкин Н.И. Современный взгляд на тектоническое строение центральной части Русской плиты // Геологический вестник центральных районов России. 1998. № 2–3. С. 5–18.
- 2. Шиловская Т.И., Шиловский А.Т. Тектоника московской синеклизы по результатам переинтерпретации геофизических материалов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2003. № 10. С. 19–26.
- 3. Куликов, Г.В., Желваков А.В., Бондаренко С.С. Минеральные лечебные воды СССР. М.: Недра, 1991. 399 с.
- 4. ГОСТ Р 54316 2011. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2011.
- 5. Николаев Ю.В. Сульфатные натриевые воды северной части Московского артезианского бассейна // Советская геология. 1975. № 9. С. 144–149.
- 6. Труфанов А.И., Труфанов А.Р. Сероводородные источники севера Русской плиты как объекты природного наследия и бальнеологии // Геология в школе и в вузе: сборник докладов на международной конференции. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2017. С. 270–273.
- 7. Труфанов А.И. Минеральные воды санаторно-курортный потенциал Вологодской области // Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции. Пенза: РИО ПГСХА, 2005. С. 220–223.

# II. СИСТЕМА «ВОДА – ПОРОДА». ШАГИ ВПЕРЕД

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-127-131

# ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ СТРОНЦИЯ В ВОДАХ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ КЕРЧЕНСКО-ТАМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Айдаркожина А.С.<sup>1,2</sup>, Лаврушин В.Ю. <sup>1,2</sup>, Кузнецов А.Б.<sup>3</sup>, Сокол Э.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт РАН, Москва, altin.echo@mail.ru

<sup>2</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск

<sup>3</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург

Аннотация. Исследован изотопный состав стронция в водах грязевых вулканов Северо-Западного Предкавказья. Показано, что значения  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr меняются от 0.70734 до 0.71076. Отмечены положительные корреляции  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr со значениями  $^{618}$ O в воде и температурами флюидогенерации, оцененными по Mg-Li-геотермометру. Полученные данные позволяют сделать вывод об изолированности грязевулканических систем Керченско-Таманской области от флюидных систем нижних — мезозойских комплексов осадочного чехла Западно-Кубанского прогиба. Эти исследования также показали, что важную роль в водном балансе грязевулканических систем играют дегидратационные воды, выделяющиеся при переходе смектита в иллит. Весь комплекс полученных материалов указывает на локализацию этих процессов в толще отложений майкопской серии.

**Ключевые слова**: грязевые вулканы, изотопный состав стронция, Предкавказье.

Annotation. The isotopic composition of strontium in the waters of mud volcanoes of the Northwestern Ciscaucasia was studied. It has been shown that the  $^{87}\mathrm{Sr/^{86}Sr}$  values vary from 0.70734 to 0.71076. Positive correlations of  $^{87}\mathrm{Sr/^{86}Sr}$  with the  $\delta^{18}\mathrm{O}$  values in water and fluid generation temperatures estimated by the Mg-Li geothermometer were noted. The data obtained allow us to conclude that the mud volcanic systems of the Kerch-Taman region are isolated from the fluid systems of the lower - Mesozoic complexes of the sedimentary cover of the West Kuban trough. These studies also showed that an important role in the water balance of mud volcanic systems is played by dehydration waters released during the transition of smectite to illite. The entire complex of the obtained materials indicates the localization of these processes in the thickness of the Maikop Group deposits.

Key words: mud volcanoes, strontium isotopic composition, Ciscaucasia.

# Введение

Исследование грязевулканических эманаций дает получить возможность представление особенностях глубинных геохимических флюидных систем нефтегазаносных бассейнов. Однако до сих пор остаются дискуссионными вопросы оценки глубин формирования газовой и водной составляющих грязевулканических выбросов, механизмов обогащения их вод микрокомпонентами и формирования на глубине больших объемов разжиженной глинистой пульпы. Эти вопросы актуальны и при исследовании грязевых вулканов Керченско-Таманской грязевулканической области (Северо-Западное Предкавказье). Вулканы этой области локализуются в южной части Западно-Кубанского прогиба, примыкающей к горным сооружениям Большого Кавказа и Крыма. Верхний структурный этаж Западно-Кубанского бассейна сложен отложениями кайнозойского возраста, большая часть мощности которых (до 4-6 км) приходится на сильноглинистые отложения майкопской серии (олигоцен – ранний миоцен). Их подстилают карбонатные и терригенные отложения мела и юры. По поводу глубин заложения «корней» грязевых вулканов в этом районе имеются весьма противоречивые точки зрения. Например, Е.Ф. Шнюков [1] предполагает питание грязевулканических систем из отложений мезозойского возраста или даже более глубоких горизонтов земной коры. С другой стороны, многочисленные оценки температур флюидогенерации, выполненные по гидрохимическим геотермометрам, указывают на относительно небольшие температуры формирования грязевулканических вод – от 20–40 до 80–140 °C [2–4]. Такие температуры флюидогенерации соответствуют глубинам от 1 до ~4 км и косвенно указывают на связь грязевулканических резервуаров с отложениями майкопской серии.

Решить проблему наличия/отсутствия связи грязевулканических вод с карбонатными коллекторами мезозоя можно, исследовав изотопный состав стронция в солевом составе вод. Известно [5], что осадочные карбонаты мелового возраста характеризуются пониженными значениями  $^{87}\mathrm{Sr}/^{86}\mathrm{Sr}$  (до 0.707) и по этому параметру резко отличаются от карбонатов кайнозоя и от силикатного матрикса разновозрастных глинистых пород ( $^{87}\mathrm{Sr}/^{86}\mathrm{Sr} > 0.709$ ). В связи с этим нами были проведены исследования изотопного состава стронция в водах грязевых вулканов Керченско-Таманской области.

# Материалы и методы исследования

Ранее изотопный состав стронция был исследован только в 11 вулканах Таманского полуострова [6]. В 2015 и 2017 гг. было проведено дополнительное обследование 17 вулканов Керченского п-ва. Таким образом, определениями <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr было охарактеризовано 30 вулканов, и это позволило рассмотреть общие закономерности изменения значений <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в пределах всей Керченско-Таманской области развития грязевого вулканизма.

Определения  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr были выполнены в ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург) (таблица). Помимо этого, в собранной коллекции проб воды и газов в ГИН РАН (г. Москва) были выполнены определения  $\delta^{18}$ O и  $\delta^{2}$ H в H<sub>2</sub>O,  $\delta^{13}$ C в HCO<sub>3</sub>,  $\delta^{13}$ C в CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub>. Для оценки температур флюидогенерации использовался Mg-Li-гидрохимический геотермометр, рассчитываемый по результатам определения химического состава воды [2, 4].

Результаты определений  $^{87}{\rm Sr}, \delta^{18}{\rm O}$  в водах грязевых вулканов Керченского полуострова

No	Название	Широта	Долгота	Мин. г/л	δ <sup>18</sup> O,	δ <sup>2</sup> H, ‰	87Sr/86Sr	Sr, мкг/л	HCO <sub>3</sub> , мг/л	Cl, мг/л
2-15	ист. Сероводородный	45.461789	36.312878	16.0	-3.3	-35.5	0.70862	22307	610	15035
5-15	Булганакский	45.425899	36.478852	13.6	13.3	-22	0.70910	3775	5246	3830
9-2- 15	Еникальский	45.379238	36.619914	11.3	12.8	-30	0.70887	2493	6710	1433
10-15	Арма-Эли	45.182564	35.578069	12.4	6.1	-22	0.70864	1286	2440	5886
11-15	Насырский	45.290809	35.681821	15.3	0.8	-25	0.70804	2134	2562	7446
13-15	Королёвский	45.266848	35.784911	35.4	13.8	-4	0.70934	26890	2684	21205
16-15	Бурашский	45.398712	36.336109	10.9	3.6	-19	0.70937	1603	1708	5815
19-15	Чонгеленский	45.153579	36.377368	15.0	0.1	-29	0.70863	2045	4270	6170
21-15	Борух-Оба	45.121333	35.999804	14.0	11.2	-14.2	0.70978	987	7808	1773
23-15	ист. Сеит-Эли	45.312331	36.185415	9.4	9.2	-38	0.70976	1535	4514	1872
201- 1-17	Булганакская группа. озеро	45.422943	36.477616	-	11	-14.6	0.70927	3253	7564	55141
202- 2-17	в.Ольденбургского сальза 2	45.424556	36.485477	13.5	12.5	-20.0	0.70869	11265	5856	3368
202- 3-17	в.Ольденбургского сальза 3	45.424671	36.485536	13.1	11.8	-22.5	0.70870	10111	5856	3191
203- 17	сопка Андрусова боковая сальза	45.426673	36.477517	13.6	13.5	-23.8	0.70934	2412	5978	3368
204- 17	Большой Тарханский	45.440458	36.438094	13.0	14	-21.7	0.70956	2711	4270	4609
204- 2-17	Большой Тарханский, 3-ий выход	45.440706	36.437546	12.5	14.5	-22.4	0.70954	4487	4270	4255
205- 1-17	оз.Тобечик, нефтяной источник	45.153393	36.378508	64.9	0.7	-29.0	0.70857	15275	3660	35708
208- 1-17	Еникальский	45.378377	36.619699	9.8	-1.0	-44.4	0.70887	1856	3904	2659
ss-17- 1-6	Солдатско- Слободская сопка	45.329207	36.450946	10.0	5.6	-24.3	0.70912	455	3050	3900

## Результаты исследования

Воды грязевых вулканов Керченско-Таманской области характеризуются довольно специфическим составом. Их pH варьируется от 7.0 до 8.9, а Eh – от –220 до -110 мV. Минерализация в большинстве вулканов меняется от 5 до 20 г/л (мин.<sub>средн.</sub> =  $12.6 \pm 3.5$  г/л. для n=78). Среди основных компонентов доминируют ионы Cl, HCO<sub>3</sub> и Na, поэтому воды в большинстве случаев относятся к Cl-HCO<sub>3</sub>-Na-типу. Концентрация HCO<sub>3</sub>- в большинстве вулканов меняется от 1.4 до 9.2 г/л (HCO<sub>3</sub>- cp =  $4.5 \pm 1.8$  г/л для n= 82). Воды также сильно обогащены бором. Его содержание меняется от 0.6 мг/л до 1.64 г/л составляя в среднем 310 мг/л.

Содержание Sr в грязевулканических водах варьируется в широком интервале значений — от 0.1 до 42 мг/л. Самые высокие концентрации этого элемента характерны для минерализованных вод Cl-Na и Cl-Na-Ca-типов, встречающихся на вулканах Гладковский. Королёвский и Тобечик. В остальных случаях с ростом концентрации  $HCO_3^-$  содержание Sr резко снижается, регулируясь, очевидно, карбонатным равновесием. Надо также заметить, что, помимо вулканов, с водами Cl-Na-типа повышенные концентрации Sr в целом характерны для вулканов, располагающихся в предгорьях Большого Кавказа (вулканы Семигорский и Шуго). Значение коэффициентов концентрирования Sr в грязевулканических водах для большинства вулканов меняется в диапазоне от 0.1 до 2.0. Это указывает на незначительное концентрирование Sr в грязевулканических водах. Исключение составляют воды только отдельных вулканов (Гладковский, Шуго, Семигорский, Королёвский, Ольденбургский), в которых  $K_{Sr}$  варьируется от  $\sim$ 5 до 9.

Значения <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в водах вулканов варьируются в диапазоне от 0.70804 до 0.70978 (таблица). Из общей выборки выделяются только два вулкана Таманского полуострова – Гладковский (0.71076) и Семигорский (0.70734), расположенные в предгорьях Большого Кавказа. В пределах Керченско-Таманской области отмечается зональность в распределении значений <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr. Более высокими значениями <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr (> 0.709) характеризуются вулканы западной части Таманского и центральной части Керченского полуострова. Для вулканов, тяготеющих к побережью Керченского пролива и горным сооружениям Большого Кавказа и Крыма, напротив, характерны пониженные значения изотопно-стронциевого отношения (<0.709).

Показано, что значения  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr положительно коррелируют с  $\delta^{18}$ O в воде (рис. 1). Это указывает на то, что обогащение грязевулканических вод тяжелым изотопом Sr является следствием взаимодействия вод с вмещающими породами, которое одновременно приводит к обогащению вод тяжелыми изотопами стронция и кислорода. Природа этого процесса, как и многие вопросы, связанные с проблемой грязевого вулканизма, остается дискуссионной. Предполагается, что рост значений  $\delta^{18}$ О в грязевулканических водах может быть следствием взаимодействия как с карбонатными, так и с силикатными (глинистыми) минералами [7. 8]. Анализ вероятных механизмов обогащения грязевулканических вод Таманского полуострова тяжелым изотопом кислорода показал [8], что, вероятнее всего, наибольший вклад в этот процесс вносит перекристаллизация глинистых минералов (переход смектита в иллит). Действительно, анализ взаимосвязи концентраций Cl-иона и значений  $\delta^{18}$ O в водах показывает. что воды, максимально обогащенные тяжелым изотопом кислорода, характеризуются минимальными концентрациями хлоридов. Такое взаимоотношение концентраций Cl и значений  $\delta^{18}$ О может быть следствием только процесса дегидратации глинистых минералов. Следует также заметить, что если бы воды взаимодействовали только с карбонатными породами, то концентрация хлор-иона была бы нечувствительна к изменению значений  $\delta^{18}$ О в воде.

Также было показано, что богатые тяжелым изотопом кислорода воды характеризуются максимальными температурами (tMg-Li) флюидогенерации (рис. 2). Поскольку значения  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr чувствительны к изменению  $\delta^{18}$ O, они, так же как и изотопный состав кислорода, показывают положительную зависимость от температур (tMg-Li) флюидогенерации грязевулканических вод.

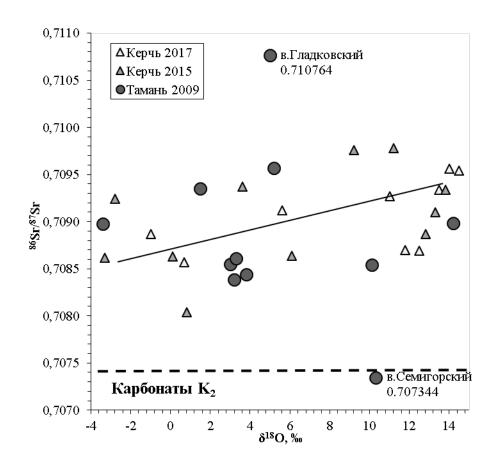


Рис. 1. Соотношение значений  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr и  $\delta^{18}$ O в водах грязевых вулканов Керченско-Таманской грязевулканической области. Пунктирной линией показаны максимальные значения  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr для карбонатов верхнемелового возраста, прямой – линия тренда.

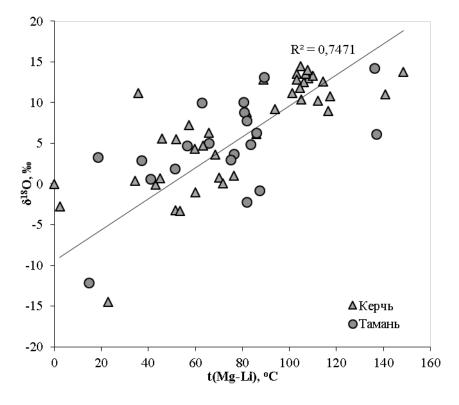


Рис. 2. Взаимоотношение расчетных (Mg-Li) температур формирования солевого состава вод и значений  $\delta^{18}$ О в водах грязевых вулканов Керченско-Таманской области.

#### Заключение

В результате проведенных исследований было показано, что воды с пониженными значениями <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, генезис которых может быть следствием взаимодействия с мезозойскими карбонатами, являются более «холодными» и, соответственно, менее глубинными. Это противоречит гипотезе об участии в формировании грязевулканических вод Керченско-Таманской области флюидных систем подмайкопских отложений, контактирующих с карбонатными породами мезозойского возраста.

Вместе с тем остается вопрос о природе пониженных значений <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в более «холодных» водах вулканических систем. Мы предполагаем, что наблюдаемые в грязевулканических водах взаимоотношения <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr-δ<sup>18</sup>O-t(Mg-Li) (рис. 1 и 2) могут отражать геохимические особенности верхней части осадочного чехла Западно-Кубанского прогиба. Эволюция его состава тесно связана с историей формирования горных систем Кавказа и Крыма. Считается [9], что активные процессы горообразования в пределах Большого Кавказа начались в миоцене. Вероятно, именно с этого времени массивы карбонатных комплексов юры и мела, слагающие горные сооружения Большого Кавказа и Крыма, начали подвергаться активной водной эрозии, поэтому верхняя часть осадочного чехла Западно-Кубанского прогиба должна содержать большое количество продуктов их размыва. Также следует принимать во внимание еще и покровно-надвиговую структуру северного склона Большого Кавказа. Наличие пологих надвигов обеспечивает в предгорных районах перекрытие майкопских отложений более древними комплексами мезозойского возраста (в том числе и карбонатными). Этим можно объяснить присутствие в некоторых низкотемпературных водах стронция с пониженными значениями <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr.

В целом, проведенные исследования изотопного состава стронция не выявили признаков поступления флюидов из мезозойских комплексов осадочного чехла Западно-Кубанского прогиба. Эти материалы также не противоречат нашим наблюдениям, согласно которым наряду с седиментационными водами не менее важную роль в формировании водного баланса грязевулканических систем играют дегидратационные воды, образующиеся при перекристаллизации глинистых минералов – при переходе смектита в иллит. Они же и обеспечивают извлечение из глинистого матрикса пород стронция, обогащенного радиогенным изотопом (<sup>87</sup>Sr).

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 17-17-01056П.

- 1. Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И., Науменко П.И., Кутний В.А. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области (атлас). Киев: Наукова Думка, 1986. 148 с.
- 2. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. Тр. ГИН РАН. Вып. 599. М.: ГЕОС. 2012. 348 с.
- 3. Ершов В.В., Левин Б.В. Новые данные о вещественном составе продуктов деятельности грязевых вулканов Керченского полуострова // ДАН. 2016. Т. 471. № 1. С. 82–86.
- 4. Kikvadze O.E.. Lavrushin V.Yu.. Polyak B.G. Chemical geothermometry: application to mud volcanic waters of the Caucasus region // Frontiers of Earth Sciences. 2020. № 6. P. 31–50.
- 5. Veizer J., Ala D., Azmy K. et al.  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr,  $\delta^{13}$ C and  $\delta^{18}$ O evolution of Phanerozoic seawater // Chemical Geology. 1999. V. 161, No 1. P. 59–88.
- 6. Буякайте М.И., Лаврушин В.Ю. Покровский Б.Г., Киквадзе О.Е., Поляк Б.Г. Изотопные системы стронция и кислорода в водах грязевых вулканов Таманского полуострова (Россия) // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 1. С. 52–59.
- 7. Селецкий Ю.Б. Дегидратация глин как возможный фактор формирования изотопного состава глубоких подземных вод // Водные ресурсы. 1978. № 3. С. 148–152.
- 8. Лаврушин В.Ю., Дубинина Е.О., Авдеенко А.С. Изотопный состав кислорода и водорода вод грязевых вулканов Тамани (Россия) и Кахетии (Восточная Грузия) // Литология и полезные ископаемые. 2005. № 2. С. 143-158.
  - 9. Большой Кавказ в альпийскую эпоху / Под ред. Ю.Г. Леонова. М.: ГЕОС, 2007. 368 с.

# СТРОНЦИЙ И ИЗОТОПНОЕ ОТНОШЕНИЕ <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ПОДЗЕМНЫХ РАССОЛОВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АНГАРО-ЛЕНСКОГО АРТЕЗИАНСКОГО БАССЕЙНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-132-136

Алексеева Л.П. $^{1,2}$ , Алексеев С.В. $^{1}$ 

 $^{1}$ Институт земной коры CO PAH, Иркутск, salex@crust.irk.ru  $^{2}$ Иркутский государственный университет, Иркутск, lalex@crust.irk.ru

Аннотация. Содержание и изотопный состав стронция определены в пробах крепких рассолов Ангаро-Ленского артезианского бассейна. Рассолы вскрыты на глубине 1500–3000 м и приурочены к соленосной и подсолевой гидрогеологическим формациям. Они характеризуются высокой минерализацией (385–530 г/дм³) и высоким содержанием Sr (2.3–7.0 г/дм³). Оотношение <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr составляет от 0.70800 до 0.71306. Большинство проб рассолов по изотопному составу близко к водам венд-кембрийского палеоокеана, однако отдельные пробы рассолов из подсолевой части осадочного разреза бассейна значительно обогащены тяжелым изотопом стронция по сравнению с водами палеоокеана и другими пробами. Вероятно, это обусловлено существенным привносом <sup>87</sup>Sr в рассолы в ходе длительного взаимодействия подземных вод с вмещающими их нижнекембрийскими песчаниками.

**Ключевые слова:** подземные рассолы, содержание стронция, стронциевое изотопное отношение, Ангаро-Ленский артезианский бассейн.

**Abstract.** The Sr concentration and Sr isotopic composition was measured in the samples of strong brines from the Angara-Lenskiy artesian basin. The brines were collected at the depth of 1.500–3.000 m and are confined to the saltbearing and subsalt-bearing hydrogeological formations. They have high salinity (385–530 g/L) and high Sr content (2.3–7.0 g/L). The <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratio ranges from 0.70800 to 0.71306. Most brine samples exhibit an isotopic composition similar to Vend-Cambrian paleoocean water, however several samples from the subsalt-bearing part of sedimentary section are significantly more radiogenic than Vend-Cambrian paleoocean water and others. It suggests that a considerable amount of <sup>87</sup>Sr is likely to have been carried from the Low Cambrian host sandstones due to a water-rock interaction.

Key words: ground brines, strontium content, isotopic strontium ratio, Angara-Lena artesian basin.

#### Введение

Ангаро-Ленский артезианский бассейн (АБ) занимает южную часть Сибирской платформы. В его северо-восточной части открыт ряд крупных месторождений нефти и газа, продуктивные горизонты которых связаны с отложениями вендского и кембрийского возраста. Изучение гидрогеологических условий месторождений, особенностей распространения, химического состава подземных вод — необходимый вид комплексных исследований для повышения эффективности добычи углеводородов. Несмотря на то, что стронций — один из главных компонентов химического состава рассолов, сопутствующих нефтегазовым залежам, исследованию радиогенного изотопа <sup>87</sup>Sr во флюидах уделяется недостаточно внимания. Стронциевое отношение в подземных рассолах позволяет определить источник поступления стронция в раствор, а это, в свою очередь, дает информацию о происхождении и эволюции водоносных систем.

## Материалы и методы

Изотопные отношения стронция в 18 пробах рассолов и 2 образцах песчаника измерялись на многоколлекторном масс-спектрометре МИ-1201AT, в двухленточном режиме (ленты Re-Re) на базе ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН (г. Новосибирск). Выделение Rb и Sr выполнялось методом ионообменной хроматографии на кварцевых колонках, заполненных катионитом Dowex AG W50x8, элюентом служил 2N HCl. Правильность определения изотопных отношений Sr контролировалась параллельным измерением в каждой серии образцов изотопного стандарта ВНИИМ, отношение  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr в котором составляет  $0.70800\pm7$  (2 $\sigma$ , n=6), и SRM 987 с отношением  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr  $0.71026\pm6$  (2 $\sigma$ , n=6). Кроме того, изотопный анализ стронция в восьми пробах рассолов выполнялся в компании Isotope Tracer Technologies Inc. (Ватерлоо, Канада) на масс-спектрометре термической ионизации Triton Thermo Scientific методом двойной дегазации рениевых нитей. Стандарты для контроля результатов были откалиброваны в соответствии с NIST SRM 987.

# Геология и гидрогеология

Кристаллический фундамент (AR-PR) в пределах Ангаро-Ленского АБ вскрыт скважинами на глубине от 2000 до 4000 м и более.

Подсолевая (карбонатно-терригенная) гидрогеологическая формация  $(V-C_1)$  залегает на фундаменте и сложена отложениями ушаковской и мотской свит нижнего кембрия, а также рифея. Мощность формации изменяется от 500-1000 до 2000-2500 м. Водовмещающие породы представлены песчаниками, доломитами, доломито-ангидритами. Состав рассолов в подсолевой гидрогеологической формации преимущественно хлоридный Na-Ca, Ca-Na, Mg-Ca и Ca-Mg. Минерализация подземных вод составляет 240-570 г/дм<sup>3</sup>.

Соленосная (галогенная) гидрогеологическая формация  $(\mathcal{C}_l)$  охватывает отложения усольской, бельской, булайской и ангарской свит раннего кембрия. На долю пластов каменной соли приходится более половины их суммарной мощности. Глубина залегания соленосной формации составляет 600-2500 м. Водовмещающие отложения имеют значительную мощность (1500–2000 м). Они представлены трещиноватыми и кавернозными доломитами, известняками. Рассолы вскрываются глубокими скважинами стратиграфически выдержанных келорском, шелонинском, бильчирском, христофоровском, балыхтинском и осинском горизонтах, а также в межсолевых карбонатных пластах-коллекторах. По химическому составу они относятся к хлоридным Са-Му, реже Са. Минерализация рассолов в основном составляет 270-500, максимально -631 г/дм $^{3}$ .

## Результаты и обсуждение

Определение изотопного отношения стронция ( $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr) Ангаро-Ленского АБ выполнено в пробах рассолов из соленосной (булайская и усольская свиты) и подсолевой (непская, мотская и тетерская свиты) гидрогеологических формаций. По химическому составу рассолы хлоридные кальциевые с pH=4.00–5.35, минерализацией 385–530 г/дм³ и содержанием Sr 2353–7052 мг/дм³. Одна проба хлоридного Na рассола с минерализацией 95 г/дм³ использована для сравнения (таблица).

На гистограмме представлены значения  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr, которые характерны для различных природных объектов (рис. 1). Кроме значений стронциевого отношения в крепких рассолах Ангаро-Ленского АБ, насыщающих геологический разрез  $(V-C_I)$  с мощными пластами каменной соли, здесь для сравнения также приведены значения  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr в крепких рассолах, приуроченных к несоленосным карбонатам  $(C_I-C_2)$  и кимберлитам  $(D_3-C_I)$  Оленекского АБ [1].

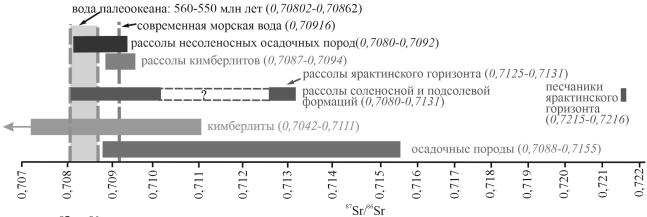


Рис. 1. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в различных природных объектах: вода палеоокеана [2, 3]; современная морская вода [4]; рассолы несоленосных осадочных формаций (Оленекский АБ, глубина 115–1650 м); рассолы кимберлитов (Оленекский АБ, глубина 170–630 м); рассолы соленосной и подсолевой гидрогеологической формаций (Ангаро-Ленский АБ, глубина 1500–3500 м; вопросительный знак – нет данных); песчаники ярактинского горизонта

подсолевой формации (Ангаро-Ленский АБ, глубина 2900–3000 м); кимберлиты ([6], глубина 50–800 м); осадочные породы (Оленекский АБ, глубина 265–1500 м).

Содержание Sr и изотопное отношение <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в рассолах Ангаро-Ленского артезианского бассейна (курсив — рассолы соленосной, прямой шрифт — рассолы подсолевой

гидрогеологической формации)

№ пробы, скв.	ческой формал Место отбора проб	Глубина отбора пробы, м	Минерализация воды, г/дм <sup>3</sup>	Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Sr <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr
1, скв.3	ı	2926–3074	514.7	145.0	7052	0.708140
2, скв.323	Усольская свита, осинский горизонт	2992–3052	499.5	143.3	6706	0.708240
3, скв.32		2599–2640	444.5	121.2	5174	0.708210
4, скв.323		2992–3052	529.6	156.9	6795	0.70800
13, скв. 1	Усоль синск	2381	509.1	145.0	6514	0.708261
15, скв.1	0	1559–1586	95.7	7.1	112	0.708451
14, скв.72	'Р' йская та, нский зонт	1670	426.3	98.7	3452	0.708716
6, скв.028	кая :а, нов- й онт	2520–2530	504.6	140.5	3246	0.708460
7, скв.028	Мотская свита, парфенов- ский горизонт	2520–2538	497.0	133.5	4588	0.708350
5, скв.97	я кий гт	2973–2986	384.9	92.0	3523	0.712521
8, скв.175	Непская свита, ярактинский горизонт	3293–3590	390.6	94.1	3508	0.712642
9, скв.157	Чеп СВК КТУ	3085–3094	394.5	98.7	3788	0.713062
10, скв.247	Н Яра	3319–3360	389.9	94.0	3817	0.712532
11, скв. 1	Тетерская свита, нижнеусть-кутский горизонт	1956–1965	409.3	82.8	2565	0.708626
12, скв.11	Катангс- кая свита, преобра- женский горизонт	1754.5–1771	401.1	91.7	2353	0.708623
16, скв. 2231	Непская свита, верхнечон- ский горизонт	1650	398.3	104.9	2519	0.710123

Значения стронциевого отношения  ${}^{87}{\rm Sr}/{}^{86}{\rm Sr}$  в подземных водах изменяются в зависимости от содержания радиогенного стронция  ${}^{87}{\rm Sr}$  – продукта радиоактивного распада

<sup>87</sup>Rb в первоначальных источниках: породах и водах палеоокеана. Кроме того, стронциевое отношение зависит от литологических особенностей вмещающих пород: в терригенных – от происхождения и стадии формирования сланцев и песчаников, в карбонатных – от возраста и степени изменения морских карбонатов, эвапоритов и фосфоритов [4].

Крепкие хлоридные Са рассолы соленосной и подсолевой формаций Ангаро-Ленского АБ находятся в гидродинамической зоне пассивного водообмена, т.е. в обстановке высокой гидрогеологической закрытости. Формирование химического состава рассолов происходило в результате метаморфизации захороненной рапы солеродного бассейна на рубеже венда и кембрия в процессе последующего взаимодействия с терригенными и карбонатными породами. Первоначальные стронциевые отношения палеоокеана в венд-кембрийское время (575–550 млн лет) изменялись в пределах 0.70802–0.70862 [3, 4]. Изотопное отношение стронция <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в рассолах соленосной гидрогеологической формации изменяется в узком интервале — 0.70800–0.70872; в рассолах подсолевой формации этот диапазон гораздо шире — 0.708350–0.713062 (рис. 2).

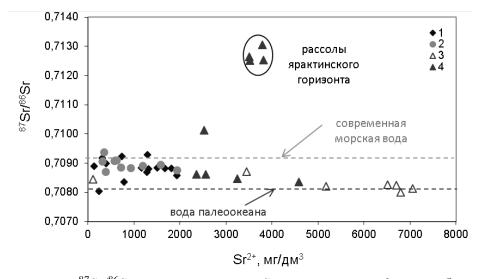


Рис. 2. Зависимость  ${}^{87}$ Sr/ ${}^{86}$ Sr от содержания Sr в рассолах: 1 — карбонатных пород Оленекского АБ, 2 — кимберлитов Оленекского АБ, 3 — соленосной гидрогеологической формации Ангаро-Ленского АБ, 4 — подсолевой гидрогеологической формации Ангаро-Ленского АБ.

Практически все значения стронциевого отношения, измеренные в пробах рассолов соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций, укладываются в диапазон между значениями в современной морской воде и воде палеоокеана. Исключение составляют рассолы ярактинского горизонта (подсолевая гидрогеологическая формация), которые формируют на графиках особую группу, отличающуюся наиболее высокими значениями стронциевого отношения (0.71252–0.71306) при содержании Sr<sup>2+</sup> 3.5–3.8 г/дм<sup>3</sup>. Они намного превышают значения <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в современной морской воде и в воде палеоокеана на рубеже венда и кембрия. Возникает вопрос: «В чем причина высокого содержания радиогенного стронция в крепких рассолах, и каков его источник?». Очевидно, ответ кроется в истории накопления венд-кембрийской осадочной толщи Сибирской платформы.

Ярактинский нефтегазоносный горизонт приурочен к непской свите в базальной части осадочного чехла, глубина его залегания составляет 2600–2700 м. Накопление существенно песчаных отложений ярактинского горизонта в непское время позднего венда (575–585 млн лет) происходило в условиях мелкого шельфа и прибрежной равнины, временами заливавшейся морем [6]. Основным источником сноса обломочного материала были внутренние районы Сибирской платформы, а также локальные выступы гетерогенного фундамента. Временные потоки переносили значительное количество продуктов разрушения горных пород, вероятно, обогащенных рубидием, которые в первую очередь заполняли

песчано-алевролитистым материалом эрозионные формы рельефа и прилегающие территории. Вследствие этого повышалось содержание радиогенного стронция и стронциевого отношения <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в породах. При трансгрессии моря устанавливалась морская обстановка осадконакопления, в результате чего сформировался глинистый слой, аргиллитами представленный OT зеленовато-серых ДО черных, слабослюдистых, пиритизированных, вероятно, с повышенным стронциевым отношением. Последующие процессы преобразования песчаников, алевролитов и аргиллитов ярактинского горизонта и взаимолействие подземных вод с породами, обогащенными радиогенным стронцием. приводили к переходу  $^{87}$ Sr в раствор. Измеренное  $^{87}$ Sr/ $^{86}$ Sr в песчаниках ярактинского горизонта с глубины 3000 м составляет 0.721507-0.721603, что однозначно подтверждает источник повышенного изотопного отношения в рассолах подсолевой гидрогеологической формации.

#### Заключение

Значения <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr в хлоридных кальциевых рассолах соленосной и подсолевой гидрогеологических формаций Ангаро-Ленского АБ в основном корреспондируют со стронциевым отношением в воде кембрийского палеоокеана. Исключение составляют рассолы ярактинского горизонта, значительно обогащенные радиогенным стронцием, вероятным источником которого в растворах являются терригенные отложения (песчаники) с высоким значением <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr благодаря процессам взаимодействия в системе вода – порода.

Авторы признательны д.-г.м.н. А.Г. Вахромееву и Е.О. Чертовских за предоставленные пробы рассолов.

- 1. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов криоартезианских бассейнов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 2. С. 183–197.
- 2. McArthur J.M., Howarth R.J., Shields G.A. The geologic time scale 2012. Chapter 7. Elsevier, 2012. P. 127-144.
- 3. Вишневская И.А., Кочнев Б.Б., Летникова Е.Ф., Киселева В.Ю., Писарева Н.И. Sr-изотопные характеристики хорбусуонской серии венда Оленёкского поднятия (северо-восток Сибирской платформы) // ДАН. 2013. Т. 449, № 3. С. 317–321.
- 4. Banner Jay L. Radiogenic isotopes: Systematics and applications to Earth Surface processes and chemical stratigraphy // Earth-Science Reviews. 2004. Vol. 65. P. 141–194.
- 5. Масловская М.Н. Изотопный состав стронция в кимберлитах Якутии и проблема их генезиса. Автореф. дис... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 1985. 20 с.
- 6. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (Стратиграфия, история развития). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 148 с.

#### ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОЗЕРА КОТОКЕЛЬСКОГО

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-137-141

Ангахаева Н.А., Плюснин А.М., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Перязева Е.Г., Жамбалова Д.И.

Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, gin@ginst.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности макро- и микрокомпонентного состава озерных вод, связанные с воздействием разгрузки в озеро трещинно-жильных вод. Выделено два очага субаквальной разгрузки, которые характеризуются формированием в озерной воде двух разных ассоциаций микроэлементов. Состав микроэлементов в трещинно-жильных водах определяется разной степенью взаимодействия их с горными породами.

**Ключевые слова:** озеро, разломы, трещиню-жильные воды, микроэлементы.

**Abstract.** The article considers the features of the macro- and micro-component composition of lake waters associated with the impact of unloading of fissure-vein waters into the lake. Two hearths of subaquatic unloading, which are characterized by the formation of two different associations of trace elements in the lake water, are highlighted. The composition of microelements in fissure-vein waters is determined by their different degrees of interaction with rocks.

Key words: lake, faults, fissure-vein waters, trace elements.

#### Введение

Озеро Котокельское (в литературе чаще Котокель) расположено на восточном побережье Среднего Байкала в 2 км от него, между устьями рек Турка и Кика. Длина озера достигает 15 км, ширина около 5 км, площадь зеркала составляет 70 км², площадь водосбора – 183 км². Озеро относится к водоемам с очень малым удельным водосбором, показатель которого равен 2.6. Глубина озера в основном составляет 4–6 м, максимальная глубина около 14 м. Из озера вытекает одна река – Исток, направление течения которой может меняться несколько раз за лето, что происходит из-за колебания уровня воды в озере [1]. Основной объем стока приходится на теплое время года. Небольшая глубина способствует тому, что вода в озере летом быстро прогревается до температуры 24–25 °C. Ранее проведенные нами исследования показали, что котловина озера интенсивно разбита разрывными нарушениями, по которым в него разгружаются трещинно-жильные воды. Эти воды привносят в своем составе микроэлементы, характерные для термальных вод [2]. Насколько существенен этот вклад в ресурсы, и в какой мере оказывают влияние на гидрохимический режим озера — неизвестно. Восполнить этот пробел в исследовании озера мы попытаемся в этой публикации.

#### Методы исследования

Нами были проведены полевые исследования и лабораторные работы. Полевые исследования проводились с 2018 по 2020 г. в ледовый и безледный сезоны года. Профили опробования проводились в местах предполагаемой разгрузки трещинно-жильных вод. На месте отбора проб воды определялись географические координаты с помощью GPSнавигатора. Температуру воды и рН измеряли на глубине 1.5 м. Пробы воды отбирались у дна озера специальным пробоотборником: для анализа макрокомпонентного состава – в пластиковые бутылки, для определения микрокомпонентов - в полипропиленовые контейнеры (15 мл), предварительно обработанные в лаборатории 0.1N азотной кислотой. На месте отбора проб образцы воды были профильтрованы через фильтры с размером пор 0.45 мкм и подкислены дважды перегнанной 0.1N азотной кислотой до pH=1-2. Анализ макрокомпонентного состава воды выполнен в сертифицированной лаборатории Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) по стандартным методикам для пресных и соленых вод. Катионы ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ ) определяли методами атомной абсорбции,  $F^{-}$ , колориметрическим,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$  и  $Cl^-$  – титриметрическим, турбидиметрическим методом. Анализ содержания микроэлементов проводился в лаборатории водной микробиологии в Лимнологическом институте СО РАН (г. Иркутск)

методом индуктивно связанной плазмы на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500 се.

# Геолого-гидрогеологические условия района

По схеме тектонического районирования оз. Котокель находится в пределах Котокельской впадины. С юго-западной и западной стороны впадина сочленяется с Кикинской котловиной. С северо-запада и севера депрессия отделяется от Среднего Байкала Котокельской грядой, которая к северу продолжается низкой горной дугой хр. Черная Грива, а на юге смыкается с отрогом Морского хребта. Северо-восточный край котловины через долину р. Коточик соединяется с Нижнетуркинской впадиной. Со стороны южной суходольной части впадина отделена от Зезивандинского структурного понижения одноименным отрогом. В морфоструктурном отношении Котокельская депрессия представляет собой южный отрезок Кикинско-Котокельско-Коточик-Туркинской группы впадин в пределах переходной части рельефа от Байкальского рифта к передовой ступени хр. Улан-Бургасы. Геологический разрез сложен стратифицированными осадочными породами архея, протерозоя, кайнозоя, интрузивные образования разного возраста. Озеро находится в пределах Байкальской гидрогеологической складчатой области в бассейне трещинных вод хребтов Хамар-Дабан, Морского и Улан-Бургасы. Водоносные горизонты трещинных вод разгружаются в озеро по разломам сбросового типа, которые широко развиты в районе исследования. Они образовались в результате общего воздымания побережья Байкала в голоцене. В исторически сложившихся тектонических условиях они испытывают растяжение и по ним в результате изостазии после таяния ледников происходят подвижки в вертикальном направлении. Зияющие сбросы остаются открытыми для движения вод, на глубине они гидравлически связаны друг с другом. Общее направление движения этих вод – в сторону Байкала.

## Полученные результаты

По нашим представлениям, в районе Котокельской впадины, где блоки горных пород фундамента в результате тектонических движений оказались опущенными, происходит перехват потока грунтовых вод и перенос их в поверхностные воды озера. Наиболее активная разгрузка наблюдается по разломам, ограничивающим впадины с юго-востока, а наиболее глубокопроникающие в недра разломы находятся в районе р. Исток. Здесь разгружаются трещинно-жильные воды по разломам северо-восточного направления, с повышенным содержанием гелия (выявленного нами ранее), в эманациях свободно выделяющегося из донных отложений газа.

Для перехвата этих вод пробы отбирались в крест простирания разломов (рис.1). Всего было отобрано 39 проб озерных вод, и сформированы выборки анализов проб по месту отбора, которые представлены в таблице. Результаты анализа, представленные в таблице, показывают, что содержание макрокомпонентов в разных частях озера существенно различается. Наиболее высокое содержание растворенных веществ зафиксировано в проливе между островом и западным берегом озера. В этих пробах обнаружены и наиболее высокие показания гидрокарбонат-иона. Здесь установлены и относительно высокие содержания сульфат-иона, максимальные обнаружены в южной и юго-восточной части озера. В ледовый период нами опробовано озеро в двух местах — в районе рек Исток и Черемушки. В Истоке минерализация не изменилась, а в местности Черемушки она возросла по сравнению с летним периодом в 1.3 раза.

Наблюдаются определенные закономерности в распределении микроэлементов в озерной воде. Дисперсия в распределении микроэлементов достигает нескольких математических порядков. Наиболее информативными оказались железо, марганец, медь, цинк, свинец, фосфор, молибден, вольфрам, стронций. Их наиболее высокие содержания были обнаружены в озерной воде в пределах расположения разрывных нарушений северовосточного направления. Первый разлом пересекает озеро от острова Монастырского до р. Исток. В озерной воде он проявляется в проливе между западным берегом озера и островом Монастырским аномальными содержаниями железа, цинка, меди, свинца, никеля,

фосфора. Эти же элементы в относительно высоких концентрациях обнаруживаются в северо-восточной части озера в районе р. Исток.

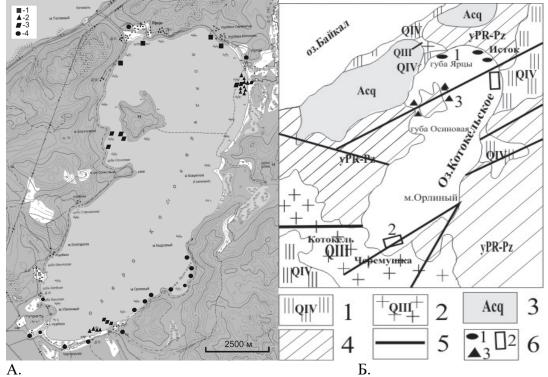


Рис 1. Топографическая и гидрогеологическая карты района расположения озера Котокель с местами отбора проб. Места и даты опробования A: I-22.07.2018, 2-11.04.2019, 3-12.07.2019, 4-29.07.2020; E: I- водоносные горизонты современных четвертичных отложений (валуны, галечники, пески, суглинки), 2- водоносный горизонт верхнечетвертичных отложений (пески, глины, супеси), 3- подземные воды трещиноватости метаморфических пород черногривенской свиты архея, 4- подземные зоны трещиноватости интрузивных пород разного возраста, 5- разломы, 6- места опробования воды: (1) 22.07.2018, (2) 11.04.2019, (3) 12.07.2019.

Макрокомпонентный состав воды озера Котокель в разных местах опробования, мг/дм<sup>3</sup>

Пото				, ,								, ,	Мине-
Дата		4 00	NΙ	C	Ma	Fe <sup>3+</sup>	HCO	NO	60	C1	F	11 6:0	
опробова-	pН	t, °C	Na	Ca	Mg	re	$HCO_3$	$NO_3$	$SO_4$	Cl	Г	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	рализа-
<b>РИН</b>													ЦИЯ
	Ярцы												
24.06.2018	7.3	19.7	17.5	4	1.6	1.1	54.1	4.5	2.8	4.6	0.2	2.1	92.0
	Исток												
12.07.2019	7.4	23.9	14.1	6.7	2.3	0.1	45.1	3	2.0	10.8	0.3	16.8	95.0
						Чер	емушки	I					
12.07.2019	6.6	23.9	16.0	7.4	2.3	0.2	50.8	0.6	1.9	13.3	0.2	16.0	77.7
Юго-западная часть острова Монастырского													
12.07.2019	7.4	23.1	20.6	6.7	2.7	0.1	53.4	1.9	3.3	16.8	0.3	13.8	114.7
	Губа Осиновая												
12.07.2019	7.0	23.5	14.9	6.8	1.9	0.4	47.3	1.0	2.1	10.9	0.4	11.7	93.3
						Губа	Полков	ая					
28.07.2020	7.1		6.8	8.2	2.3	0.8	43.5	0.6	5.2	3.2	0.2	5.7	74.4
						Чер	емушки	1					
30.07.2020	7.2		10.6	7.0	2.4	0.8	47.9	0.6	6.3	3.9	0.3	5.7	83.5
Губа Золотая													
30.07.2020	6.9		11.0	6.0	3.6	0.1	48.8	0.2	7.2	3.9	0.3	5.8	84.8
					Ис	ток, ле	едовый і	териод			•		
11.04.2019	7.4	1.3	13.6	6.2	2.2	0.04	44.2	3.7	3.5	5.7	0.2	20.7	94.1

Черемушки, ледовый период													
11.04.2019	6.5	1.2	13.1	8	3.3	0.1	55.7	2.7	5.6	5.9	0.1	19.1	106.7

Другая ассоциация микроэлементов выделяется в пределах разрывного нарушения, протягивающегося через акваторию озера от с. Черемушки до губы Полковой. Здесь в ассоциации элементов наиболее контрастны содержания вольфрама по сравнению с другими пробами в озере, обнаруживаются аномальные показатели железа фосфора, хрома, стронция.

Нами исследовано поведение лантаноидов в озерной воде в этих местах. В редкоземельных элементах наблюдаются существенные различия. Максимальное суммарное содержание в выборке проб, отобранных у острова Монастырского, достигает 0.8425 мкг/дм<sup>3</sup>. В других местах содержание меньше, но в районах распространения разрывных нарушений возрастает. В районе губы Осиновой содержание редкоземельных элементов достигает 0.366 мкг/дм<sup>3</sup>, а в районе губы Полковой -0.438 мкг/дм<sup>3</sup>.

На рис. 2 представлены спектры распределения лантаноидов, нормированные на состав Североамериканского сланца.

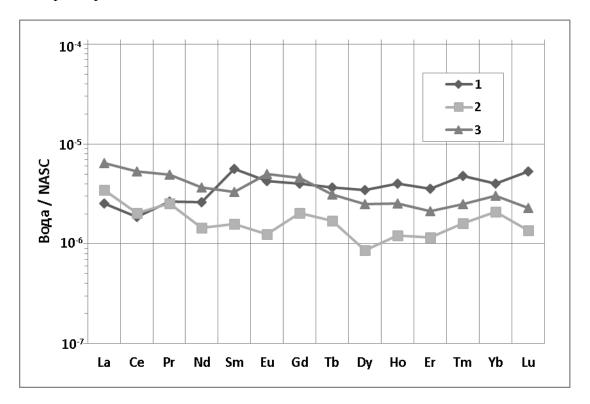


Рис. 2. Спектры распределения концентраций редкоземельных элементов нормированные на содержание в Североамериканском сланце (NASC), в пробах озерной воды. Условные обозначения: I — местность губа Полковая (28.07.2020 г.), 2 — местность губа Осиновая, 3 — остров Монастырский (12.07.2019 г.).

В районе острова Монастырского и местности Осиновая губа наблюдается общая закономерность уменьшения концентрации от легких редкоземельных элементов к тяжелым. В их спектре наблюдаются колебания, но общая тенденция сохраняется. Особенно ярко это прослеживается в пробах воды, отобранных в районе острова. В озерной воде в районе губы Полковой наблюдается обратная зависимость и рост содержаний тяжелых редкоземельных элементов.

## Обсуждение полученных результатов

Проведенные гидрогеохимические исследования показали, что в озере Котокель заключены неодинаковые по химическому составу воды. Наблюдаются существенные отличия и в макро-, и в микрокомпонентном составе вод в различных районах озера. С биологическими процессами, вероятно, связано поступление в озерную воду

гидрокарбонатов, нитратов. Другая часть поступает в результате антропогенной нагрузки на озеро, например сульфат и хлорид – с коммунально-бытовыми стоками от населенных пунктов и домов отдыха. Третья часть привносится в процессе субаквальной разгрузки трещинно-жильных вод, с которой связана и дисперсия содержания редкоземельных элементов, выщелачиваемых из продуктов разрушения горных пород при длительной фильтрации от мест питания до разгрузки в озеро. Установленные аномальные содержания микроэлементов в придонной воде озера характерны для трещинно-жильных вод, в том числе и для термальных вод. Разгружающиеся трещинно-жильные воды содержат в своем составе биогенные элементы, которые благоприятствуют развитию водной растительности.

Установленные закономерности в распределении РЗЭ показывают, что разгружающиеся в озеро трещинно-жильные воды имеют разную степень взаимодействия с породами. Ресурсы юго-восточной части озера формируются под воздействием наиболее метаморфизованных трещинно-жильных вод, здесь накапливаются тяжелые редкоземельные элементы, в значительных количествах обнаруживается вольфрам, фосфор, которые характерны для термальных вод Байкальского региона.

#### Заключение

Химический состав воды озера Котокель в значительной степени формируется за счет трещинно-жильных вод. Разгрузка этих вод происходит по тектоническим нарушениям северо-восточного простирания, которые секут акваторию озера в двух местах. По этим разрывным нарушениям поступают воды, обогащенные рядом микроэлементов, включая термофильные и биофильные. Наличие разгрузки трещинно-жильных вод благоприятствует развитию биоты в озере Котокель.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту AAAA-A21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока, частично работы финансировались по гранту РФФИ № 18-45-030003.

- 1. Озеро Котокельское: природные условия, биота, экология / Отв. ред.Н.М. Пронин, Л.Л. Убугунов. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. 320 с.
- 2. Перязева Е.Г., Плюснин А.М., Гармаева С.З., Будаев Р.Ц., Жамбалова Д.И. Особенности формирования химического состава вод озер восточного побережья Байкала // География и природные ресурсы. 2016. № 5, С. 49–59. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(49-59).

# ГЕОХИМИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-142-146

Борзенко С.В.<sup>1</sup>, Дребот В.В.<sup>2, 3</sup>, Федоров И.А.<sup>1</sup>, Лепокурова О.Е.<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, Чита, svb\_64@mail.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

<sup>3</sup>Томский филиал Института нефтяной геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

Томск, drebotvv@rambler.ru

Аннотация. Установлено, что содовые подземные воды на юго-востоке Забайкалья пользуются региональным распространением, залегают они в различных осадочных мезокайнозойских отложениях в зоне замедленного водообмена. Воды, локализованные в наиболее высокоподнятых горных сооружениях, наименее минерализованные и менее щелочные, по мере снижения абсолютных отметок и транзита вод к центральной части бессточной области соотношение в растворе элементов непрерывно меняется, изменяется состав вторичных минеральных образований, накапливаются тяжелые изотопы воды и подвижные элементы. Все эти процессы постепенно приводят к росту рН, солености вод и смене химического состава с формированием на одной из стадий содовых вод.

Ключевые слова: содовые воды, взаимодействие воды с горной породой.

**Abstract**. It has been revealed that soda groundwaters have been found in the South-East of Transbaikalia. They are observed in various sedimentary Meso-Cenozoic sediments in the zone of delayed water exchange. The least mineralized and less alkaline waters are localized in the highest mountain structures. The ratio of elements continuously varies in water, the composition of secondary mineral formations changes, heavy isotopes of water and mobile elements accumulate, with a decrease in absolute levels and water motion to the central part of the drainless territory. All these processes gradually lead to an increase of pH, water salinity, a change in the chemical composition, with the soda water formation at one of the stages.

**Keywords:** soda water, water-rock interaction.

#### Введение

Отсутствие теории, которая увязывает в единое целое процессы формирования химического состава воды, преобразования горных пород, органического вещества, газов, не позволяет раскрыть основные закономерности взаимодействия всех составляющих ландшафта. Отсюда возникает множество спорных моментов в гидрогеохимии, особенно это касается генезиса содовых вод. Цель наших исследований заключается в выделении основных условий, контролирующих химический состав подземных вод аридной зоны Юго-Восточного Забайкалья, наиболее развитого сельскохозяйственного региона, в котором проблема содового засоления воды стоит остро и требует незамедлительного решения. Более того, решение конкретной задачи позволит понять природу содового состава вод, поскольку, как считал Е.В. Пиннекер, содовые воды занимают промежуточное положение между пресными НСО<sub>3</sub>-Са и солеными C1-Na водами, а значит, определяют механизм и направленность процесса эволюции состава вод [1].

# Природные условия региона

Климат изучаемой территории характеризуется резкой континентальностью — холодной продолжительной зимой и коротким сравнительно жарким летом. Количество атмосферных осадков составляет 180–400 мм/год, а испарение — 300–500 мм/год, поэтому в регионе широко развиты процессы континентального засоления [2]. Рельеф территории преимущественно низкогорный, пологохолмистый и равнинный. Уклон рельефа направлен с северо-запада на юго-восток, в сторону озер Зун- и Барун-Торей, которые расположены в пределах территории с наиболее низкими абсолютными отметками. Часть изученных подземных вод локализована в пределах Торейской впадины. По гидрогеологическому районированию эта территория относится к Торейскому артезианскому бассейну, характеризующемуся нижнемеловыми и кайнозойскими отложениями чехла и отсутствием стока. Другая часть изученных водопроявлений приурочена к низкогорному обрамлению впадины, сложенному преимущественно метаморфическими породами, базальтоидами, реже гранитоидами.

## Результаты исследований

По химическому составу вод выделено пятнадцать подтипов (по Щукареву) (таблица). Первые три подтипа (I, II и III) характеризовались самыми высокими дебитами источников (~1−15 л/с), низкими значениями TDS и рH, в анионном и катионном составах преобладали  $HCO_3^-$  и  $Ca^{2+}$ . Следующие пять подтипов подземных вод (IV–VIII) так же, как и первые три, были отобраны из скважин и колодцев, расположенных в горных районах, окружающих впадину, в различных геологических структурах, с дебитами ~0.5-5.0 л/с. Эти подтипы отличались повышенными концентрациями Mg<sup>2+</sup> и Na<sup>+</sup> и более высоким pH, чем первые три подтипа. Переход к IX и X подтипам сопровождался увеличением значений TDS, pH и концентрации Na<sup>+</sup>. Большая часть проб воды, отнесенных к IX и X подтипам, была взята из родников (расход  $\sim 0.2-0.5$  л/с), скважин и колодцев, расположенных у подножия склонов, в низинах и в бассейнах озер. Проба воды, взятая из лужи на базальтах полуострова Мирген (оз. Зун-Торей) через сутки после выпадения осадков, также была отнесена к X подтипу; несмотря на короткое время взаимодействия и относительно низкое значение TDS (0.4 г/л), вода имела относительно высокое значение рН (8.7), в химическом составе преобладали Na<sup>+</sup> и НСО<sub>3</sub>-. Подземные воды, отобранные на анализ в центральной части Торейской впадины и в котловине соленых озер Борзинской группы (восточнее от Торейской впадины), отнесены к XI–XV типам. Все водопункты расположены в рыхлых осадочных отложениях. Дебиты составляют десятые и даже сотые доли л/с. Воды наиболее минерализованные и щелочные, со смешанным анионным составом с увеличением в нем содержания С1- с ростом солености воды, а в катионном составе –  $Na^+$ .

В целом, анализ состава вод показывает, что при продвижении подземных вод от горного обрамления впадины к ее центральной части растет соленость и рН вод, одновременно накапливаются  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $CI^-$  и  $SO_4^{2-}$ ,  $Na^+$ . Слабо проявляется связь солености с содержанием  $Mg^{2+}$  и  $K^+$  и совсем отсутствует с  $Ca^{2+}$ . Аналогично основным анионам ведет себя и  $F^-$ , максимальное количество которого (8.5 мг/л) фиксируется в наиболее соленой и щелочной воде. Среди микроэлементов наиболее высокими концентрациями выделяются Si, Fe, Sr, Mn, Br (мг/л): до 15.2, 8.7, 5.1, 1.5 и 1.4 соответственно. Для одной группы микроэлементов (V, Br, B, Se, Mo, W, U) прослеживается рост их содержаний по мере роста солености и рН вод (коэффициент корреляции r > 0.5), для других такое поведение не характерно [3].

Помимо химического состава вод нами был изучен изотопный состав рассматриваемых водопроявлений. По нашим данным, соотношение тяжелых изотопов воды атмосферных осадков региона подчинено линейной зависимости, которая описывается уравнением:  $\delta D = 8.0 \ \delta^{18}O + 9.2$ . Полученные значения изотопных соотношений подземных вод варьируются от -14.4 до -8.0 по  $\delta^{18}O$  и от -108 до -70 % по D. Облегченный состав водорода имели воды, отобранные на анализ из скважины, расположенной в самой западной части района исследований на более высокой отметке, а наиболее тяжелый — из скважины на юго-западном берегу оз. Зун-Торей. В целом проявляется связь  $\delta D$  с координатами местности: высотой и широтой (r = 0.7).

Следовательно, подземные воды рассматриваемого региона имеют зональный (поясной) наиболее характер. Воды, локализованные В высокоподнятых горных сооружениях, наименее минерализованные менее шелочные. И гидрокарбонатный анионный и смешанный катионный состав. По мере снижения абсолютных отметок и продвижения воды к центральной части бессточной области растет минерализация и рН, меняется химический состав, накапливаются тяжелые изотопы воды.

Для понимания сложного поведения химических элементов и изотопных соотношений в водах методами микроскопии с помощью микрозонда и РФА был изучен минеральный состав вмещающих пород, результаты которого использовались в термодинамических расчетах.

Основные подтипы подземных вод Юго-Восточного Забайкалья и их геохимические параметры

Под	G		TDS	рН	HCO <sub>3</sub> -	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	F-	Ca <sup>2+</sup>	$\mathrm{Mg}^{2+}$	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Si	$\delta^{18} O_{VSMOW}$	δDvsow
тип	Состав	n	mS/cm						мг/л					%	0
I	HCO <sub>3</sub> Ca	27	0.1*- 0.5** 0.3***	7.3–8.2 7.6	77.8–311.1 200.8	<u>4–59.1</u> 26.6	2.1–62.3 18.9	0.2–1.4 0.4	<u>26.5–81.2</u> 59	<u>5.5–17.6</u> 10.6	6.4–26 13.6	<u>0.3–1.9</u> 1.4	1.8–4.8 3.8	( <u>-14.4</u> )-( <u>-12.5</u> ) -13.9	<u>(-108)-(-92)</u> -106
II	HCO <sub>3</sub> Ca- Mg	24	0.2–0.7 0.4	7.0–8.0 7.7	103.7–402.6 246.9	<u>2.7–62</u> 19.5	1.2–110 20.8	<u>0.2–1.8</u> 0.7	<u>24.1–80.6</u> 52	7.3–51.2 20.5	7.1–40 15.9	<u>0.7–2.1</u> 1.6	1.6–9.6 4.3	-14.1	-105
III	HCO <sub>3</sub> Ca- Mg-Na	7	0.5–0.8 0.6	7.5–8.1 7.8	<u>252.3–364.5</u> 317	32.8–100 52.6	7.3–157.2 79.5	<u>0.2–2.1</u> 1.1	47.2–89.1 72.7	<u>26.8–60.2</u> 35.5	28.2–75 46.9	1.1–2.7 1.8	<u>4.2–8.9</u> 5.9	-13.9	-101
IV	HCO <sub>3</sub> Mg- Ca	3	0.4-0.5 0.5	7.8–8.0 7.9	331–354 340.2	11.2–28.2 18.6	<u>8–14.2</u> 11.1	<u>0.5–2.5</u> 1.5	<u>22.9–48.1</u> 32.7	39.5-48.2 44.6	20.4–30.2 24.9	<u>0.8–1.</u> 5 1.3	<u>5.4–5.9</u> 5.7	_	-
V	HCO <sub>3</sub> Na- Mg-Ca	3	0.4-0.8 0.6	7.7–8.3 8.0	<u>264–450.8</u> 357.6	<u>3–96.5</u> 49	10–45.4 28.9	<u>0.7–2</u> 1.4	<u>36.2–79.6</u> 56.7	23.6–50.3 37.2	<u>19–61.1</u> 44.2	1.1–2.5 1.8	<u>5.5–5.8</u> 5.6	(-13.0)-(-12.9) -13.0	(-100)-(-96) -98
VI	HCO <sub>3</sub> Mg- Ca-Na	7	0.4-0.7 0.6	7.7–8.2 8.0	261–488 350.3	<u>5.5–102.5</u> 46.9	3.5–51.7 21.1	<u>0.2–1.9</u> 1.2	21.8–52.8 40.4	19.4-47.2 36.1	35.6–67.6 49.6	1.1–2.8 2.1	4.8–6.7 5.8	(-12.8)-(-11.9) -12.4	(-103)-(-94) -98
VII	HCO <sub>3</sub> Mg- Na-Ca	4	0.5–0.9 0.6	8.0 <u>–8.2</u> 8.1	316.6–427 393.5	21.3–163 63.9	5.9–80.6 30.5	<u>0.9–3.4</u> 2	<u>52.1–56.9</u> 36.8	<u>26.8–56.2</u> 45.1	<u>28.2–95.4</u> 67.7	1.3–4.1 2.4	5.1–7.8 6.6	(-12.7)-(-12.1) -12.4	( <u>-98)-(-95)</u> -97
VIII	HCO <sub>3</sub> Mg- Na	5	0.5–0.8 0.7	8.0 <u>–8.1</u> 8.0	342–371.6 356.8	<u>20.6–23.4</u> 22	3.6–10.1 6.9	1.2–3.1 2.1	<u>24–25.7</u> 24.9	<u>25.7–36.4</u> 31.1	60–63.2 61.6	1.5–5.7 3.1	<u>5.1–6.4</u> 5.7	-11.9	-97
IX	HCO <sub>3</sub> Na- Mg	12	0.5–1.0 0.8	7.7–8.5 8.1	305–598 428.8	11–151.5 70.2	<u>5.6–85.5</u> 43.6	1.2–3.2 2.3	11.1–70.1 31	<u>20.5–76.2</u> 42.2	<u>67.1–153.8</u> 107.2	<u>0.8–7.9</u> 3.9	<u>5.8–8.1</u> 7.1	(-12.8)-(-11.0) -11.9	( <u>-108)-(-89)</u> -96
X	Na-HCO <sub>3</sub>	10	0.9–1.4 1.0	8.5–8.8 8.7	485–799.1 634.6	<u>12–116.</u> 8 45.9	10.1–144.2 50.9	<u>0.6–6.3</u> 1.9	13.7–70 26.3	16.2–61.8 36.7	136.7–289.4 197.4	1.1–5.6 2.5	6.4–12.2 9.3	(-11.7)-(-10.8) -11.3	( <u>-90)-(-89)</u> -89
XI	SO <sub>4</sub> - HCO <sub>3</sub> -Cl Na	1	1.1	8.5	317.9	276.9	177.9	0.6	50.5	80.6	148.8	19.5	8.6	-10.7	-82.0
XII	HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> Na	5	1.9–3.2 1.9	8.5–8.8 8.6	701.5–787 744.3	435.7–1126 780.9	<u>160.4–361.6</u> 261	1.3–2.2 1.8	<u>42.1–48.6</u> 45.4	51.9–219.4 135.7	<u>453.8–666</u> 559.9	<u>2.5–8.6</u> 5.6	8.4–12.4 10.4	<u>(-11.9)-(-11.1)</u> -11.5	<u>(-96)-(-85)</u> -90
XIII	HCO <sub>3</sub> -Cl Na	6	1.1–2.4 1.8	8.8	568–703.8 823.5	138.5–450.3 310.5	93.4–343.4 214.7	1.6–4.8 3.6	15.6–40.3 27.8	30.1–75.6 48.2	162.9–528.1 389.9	1.6–14.8 10.3	8.8–11.3 10.1	(-11.4)-(-11.3) -11.4	<u>(-89)-(-88)</u> -88
XIV	Cl-HCO <sub>3</sub> Na	8	<u>0.9–4.9</u> 3.0	8.5–8.9 8.7	481.9–1348.1 774.0	<u>57.0–890.1</u> 335.2	113.5–1033.7 421.3	1.1–7.2 3.1	35.5–39.4 37.1	<u>19.6–37.2</u> 31	<u>197.0–1452.3</u> 616.3	<u>0.8–10.7</u> 4.2	9.7–12.6 11.5	(-11.1)-(-9.5) -10.3	( <u>-87)-(-81)</u> -83
XV	Cl-HCO <sub>3</sub> - SO <sub>4</sub> Na	1	3.9	9.2	1165.0	594.0	729.8	8.5	19.2	19.2	1148.0	6.8	15.6	-8.0	-70

Примечание. п – кол-во проб; \* – минимум, \*\* – максимум, \*\*\* – среднее.

В юго-восточной части обрамления Торейской впадины на изливе скважин было установлено наличие оливинового метадолерита и метабазальта, в составе которых присутствуют в разных соотношениях первичные минералы: основные плагиоклазы CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, клинопироксен M'M Si<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, титаномагнетит Fe<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub> и оливин Mg<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Среди вторичных минералов в пределах базальтов встречаются: хлориты (Mg, Fe)<sub>3</sub>AI,  $Si)_4O_{10}(OH)_2$ •3(Mg, Fe)(OH)<sub>2</sub> (40–50 %), кремнистое вещество  $SiO_2$  (5–10 %) с примесью смешанного глинистого и гидрослюдного материала – iddingsite (смесь хлорита, гетита, монтмориллонита) и bowlingite Ca<sub>0.25</sub>(Mg, Fe)(OH)n, селадонита KMgFe<sub>3</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>, ломонтита  $Ca(Si_4Al_2)O_{12} \cdot 4H_2O$ , пренита  $Ca_2Al(AlSi_3O_{10})(OH)_2$ , с примесью кальцита (1–4 %). Метаморфические породы северо-западной части обрамления впадины представлены сланцевидным кварцитом, в составе которого определены кварц (70-80 %), глинистогидрослюдистый материал: каолинит Al<sub>4</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>8</sub>, пренит, ломонтит (25–30 %) и кислые плагиоклазы (1 %). Обломки полевых шпатов интенсивно мусковитизированные, погружены в тонкозернистый мусковитовый  $KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$  цемент (30–40 %). Рыхлые осадочные породы впадины в местах разгрузки подземных вод представлены чаще разными соотношениями каолинита, Ca-Mg-K-Na-Fe-монтмориллонитов, иллитов, альбита NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, кварца SiO<sub>2</sub>, кальцита CaCO<sub>3</sub> и доломита CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.

Термодинамические расчеты с использованием программы [4] показали, что растворение горных пород происходит чаще в условиях насыщения подземных вод кальцитом, для достижения которого необходимо, чтобы соблюдались следующие условия: минерализация воды была не ниже 0.4 г/л, pH > 7.7, содержания  $HCO_3^- > 0.2 \text{ г/л}$  и  $Ca^{2+} > 0.01$ г/л. С ростом солености (> 0.6 г/л), pH (> 7.8), содержания  $HCO_3^-$  (> 0.3 г/л),  $Mg^{2+} > 0.02$  г/л подземные воды насыщаются магнезитом. При достижении солености  $0.8~\mathrm{г/л}$  и рH  $> 8.2~\mathrm{вода}$ приходит в равновесие со стронцианитом SrCO<sub>3</sub>. Кроме рассмотренных вторичных карбонатных, сульфатных, фторидных и других минералов, было изучено равновесие вод с алюмосиликатными породами, среди которых встречаются породы как основного, так и кислого и среднего состава. Термодинамические расчеты показали, что все без исключения воды насыщены каолинитом и иллитом. При солености выше 0.3 г/л и pH >7.7 вода насыщается монтмориллонитами различного состава (Ca-Mt, Na-Mt, K-Mt, Mg-Mt). С ростом солености (>0.5 г/л) и рН (>7.9) вода приходит в равновесие с мусковитом, а при более высоких ее значениях (> 0.6 г/л) и pH> 8.0 – с ломонтитом и пренитом. При солености 0.8 г/л и pH> 8.4устанавливается равновесие с Мд-хлоритом и альбитом. В соответствии с полученными данными выходит, что состав того или иного вторичного минерала контролируется определенным химическим составом, рН и соленостью вод, т.е. между этими параметрами и минеральными новообразованиями существует парагенетическая связь.

### Обсуждение

Проведенное исследование показывает, что с взаимодействия вод с породами горных сооружений и рыхлых отложений (пески, супеси и т.д.) впадины начинается литогенный этап формирования. Об этом говорит существенно возросшая величина рН, соленость, а также содержание макрокомпонентов по сравнению с атмосферными водами этого региона [3]. На этой стадии взаимодействия воды с первичными алюмосиликатами, например с анортитом и форстеритом, реакция протекает с образованием каолинита:

 $0.5Mg_2Fe_2[SiO_4]_2 + CaAl_2Si_2O_8 + 7H_2O + CO_2 = Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Fe^{2+} + 5OH^- + HCO_3^- + H_4SiO_4.$ 

Правомерность этой реакции подтверждается составом проанализированного базальта, слагающего горное обрамление Торейской впадины. Понятно, что растворяются и другие минералы, соответственно в раствор переходят, помимо Са и Мg, также Na, K, Fe, Si, Al и другие химические элементы. Но поскольку кларк Са в горной породе чаще выше, чем Mg, Na, K [5], а Al и Si связываются каолинитом и гидрослюдой Fe-сидеритом уже на начальных этапах взаимодействия, изначально Са будет накапливаться в воде в больших масштабах, но до стадии формирования кальцита. Образование кальцита приведет к смене I на II подтип, который отличается уже большей величиной солености и pH вод. Для него

характерно насыщение вод не только каолинитом и иллитом, к ним добавляются монтмориллониты различного состава (Mt–Ca, Mt–Na, Mt–K). С этого момента Na постепенно накапливается в водах, не занимая при этом лидирующих позиций. Естественно, если порода обогащена Na, то процесс содообразования наступит раньше. Такая ситуация подтверждается данными состава вод в пределах базальтов. С формирования магнезита, а эта стадия наступает с IX подтипа, в воде перестает концентрироваться  $Mg^{2+}$ , поэтому в катионном составе основным становится  $Na^+$ .

Очевидно, что среднегорный рельеф внешней области питания, небольшая мощность рыхлых отложений на водораздельных пространствах и склонах создают благоприятные условия для свободной инфильтрации атмосферных вод в зону трещиноватых пород и предопределяют направление движения трещинных вод к области разгрузки. У подножия склонов образуются многочисленные родники, далее по мере продвижения вод по впадине к центральной ее части дебиты источников существенно снижаются. Наблюдаемая картина объясняется разным водообменом, или, что то же самое, разным временем взаимодействия [5]. На этом этапе вода становится насыщенной по отношению к основным минеральным фазам гранитных пород (альбит, мусковит, и т. д.), и эти минералы больше не будут растворяться, они начинают осаждаться, образуя новые минеральные комплексы.

Для объяснения причины широкого варьирования значений изотопных соотношений воды по приведенному выше уравнению метеорных вод и по разности между измеренными и рассчитанными значениями была вычислена величина кислородного сдвига  $\Delta \delta^{18}$ O. Полученные положительные числа (от 0.3 до 4.8) указывают на обогащение воды тяжелым изотопом кислорода. Участие реакций гидролиза во фракционировании изотопов воды подтверждается связью значений  $\Delta\delta^{18}$ O с pH (r =0.7, n=55), т.е. с тем физико-химическим параметром, который наиболее показателен для этой оценки. На возможность разделения изотопов в результате взаимодействия воды с горной породой указывает утяжеление вод и по водороду за счет перехода Н во вторичные минералы как более легкого изотопа за счет изотопного кинетического эффекта. Отсюда отмечается обогащение их не только <sup>18</sup>O, но и D. Несмотря на то, что содержание водорода по сравнению с кислородом в породе ничтожно мало, тем не менее нельзя исключать возможность его фракционирования с обогащением воды дейтерием. Естественно, накопление тяжелых изотопов воды возможно при ее испарении в местах разгрузки. Данный механизм применим для солеобразующего типа. Очевидно, что в сочетании с застойным режимом и испарением создаются дополнительные условия засоления вод, поэтому одновременно с  $HCO_3^-$  и  $Na^+$  растут содержания  $SO_4^{2-}$  и  $Cl^-$ . Понятно, что содовые воды в чистом виде формируются редко, поскольку накопление  $SO_4^{2-}$ и Cl<sup>-</sup> трансформирует их в SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>-Cl Na, HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> Na, HCO<sub>3</sub>-Cl Na, Cl-HCO<sub>3</sub> Na и на конечной стадии в Cl-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> Na. Замкнутый характер Торейской впадины, отсутствие поверхностного и подземного стока увеличивают время взаимодействия воды с вмещающими породами, поэтому меняется химический и изотопный состав вод. Очевидно, что соленакопление и содообразование – это следствие одной из стадий взаимодействия воды с горными породами, которая достигается в условиях замедленного водообмена и интенсивного испарения. Все эти процессы постепенно приводят к росту солености вод, рН и смене химического состава с формированием на одной из стадий содовых вод.

- 1. Пиннекер Е.В. Основные гипотезы формирования состава концентрированных рассолов // Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия. Новосибирск: Наука, 1982. С. 202–206.
- 2. Обязов В.А. Пространственно-временная изменчивость атмосферных осадков в Юго-восточном Забайкалье // Известия Русского географического общества. 1996. Т. 128, № 2. С. 73–80.
- 3. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main conditions of soda-type groundwater formation: southeastern Transbaikal region (Russia) case study // Applied Geochemistry. 2020. Vol. 123. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104763.
- 4. Bethke C., Yeakel S. The Geochemist's Workbench Release 11 GWB Essentials Guide. 2016. https://www.gwb.com/pdf/GWB11/GWBessentials.
  - 5. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза // Геохимия. 2000. Т. 28 (2). С. 260–276.

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД (КУРОРТ «МАРЦИАЛЬНЫЕ ВОДЫ», КАРЕЛИЯ) ПО ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИМ ( $\delta^2$ H, $\delta^{18}$ O, $^3$ H, $^3$ 4He, $^{20}$ Ne, $^{234}$ U/ $^{238}$ U) ДАННЫМ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-147-151

Бородулина Г.С.  $^1$ , Токарев И.В.  $^2$ , Яковлев Е.Ю.  $^3$ , Левичев М.А.  $^1$ , Каменский И.Л.  $^4$ , Скиба В.И.  $^4$ 

<sup>1</sup>Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, bor6805@yandex.ru

<sup>2</sup>РЦ РДМИ Научный парк Санкт-Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург,tokarevigor@gmail.com

 $^{3}$ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова РАН, Архангельск, yakovlev\_eu@inbox.ru  $^{4}$ Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты

Аннотация. Курорт «Марциальные воды» использует в лечебно-питьевых целях пресные сульфатные железистые подземные воды. Основным процессом, определяющим формирование химического состава минеральной воды, является окисление сульфидов в шунгитсодержащих породах палеопротерозоя и растворение продуктов окисления, в том числе вследствие воздействия криогенных процессов в период валдайского оледенения. Значительные отличия дебита, химического и изотопного состава воды четырех близко расположенных скважин и существенный разброс возрастов их вод указывают на смешение современных и реликтовых вод. Хозяйственная деятельность в области питания подземных вод явилась причиной значительных изменений в пропорциях вклада конечных членов на фоне относительно стабильного химического состава.

Ключевые слова: Марциальные воды, изотопный и химический состав минеральных вод.

**Abstract.** The Marcial Waters resort uses fresh sulfate ferruginous underground waters for medicinal and drinking purposes. The main process that determines the formation of the chemical composition of mineral water is the oxidation of sulfides in shungite-containing rocks of the Paleoproterozoic and the dissolution of oxidation products, including due to the effect of cryogenic processes during the Weichselian glaciation. Significant differences in the flow rate, chemical and isotopic composition of the water of four closely spaced wells, and a significant spread in the ages of waters indicate mixing of modern and relict waters. Economic activity in the field of groundwater recharge has caused significant changes in the proportions of the contribution of end members against the background of relatively stable chemical composition.

**Key words:** Marcial Waters, isotope and chemical composition of mineral water

Первый русский курорт «Марциальные воды», находящийся в 50 км к северу от г. Петрозаводска, основан в 1719 г. при личном участии Петра І. Естественные источники железистых вод действовали еще в 30-х годах прошлого столетия, но исчезли после сооружения эксплуатационных скважин. В современном виде курорт действует с 1964 г. и является единственным курортом в России, использующим в лечебно-питьевых целях высокожелезистые подземные воды собственного гидрохимического типа «Марциальный». Несмотря на давнюю историю курорта, гидрогеологическая система изучена слабо. В отличие от большинства известных курортов, до сих пор нет согласованного представления об условиях формирования Марциальных вод [1]. В 2018–2020 гг. на примере Марциальных вод с использованием архива химических данных, изотопных меток и лабораторных экспериментов изучались механизмы формирования пресных подземных вод с высоким содержанием железа, характерных для Балтийского гидрогеологического массива.

Месторождение приурочено к западной части Онежской палеопротерозойской структуры в пределах Мунозерской синклинали, сложенной вулканогенно-осадочными образованиями. приурочены Подземные воды К верхней зоне трещиноватых шунгитсодержащих пиритизированных сланцев и долеритов, перекрытых моренными отложениями. Питание подземных вод происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка — путем восходящей (напорной) фильтрации через рыхлые отложения в долине оз. Габозеро (водосбор р. Шуя). Расстояние от ближайшего водораздела до области разгрузки составляет около 2.5 км, однако, возможно, что часть воды поступает с платообразной возвышенности, удаленной от эксплуатационного участка на 15–20 км.

Эксплуатируемый в настоящее время линейный водозабор длиной 500 м состоит из четырех скважин, расположенных в нижней части довольно крутого склона гряды, сложенной кристаллическими породами. Из-за трещинного типа фильтрации при одинаковых конструкциях и близком расположении эксплуатационные скважины дают заметно различающиеся дебиты самоизлива (рис. 1) и химический состав воды (таблица). В годовом разрезе дебиты скважин колеблются синхронно, с минимумом в зимнюю межень и максимумом в конце весны или начале лета. Температура воды меняется в диапазоне 4.8-6.0 °С и понижается с ростом дебита.

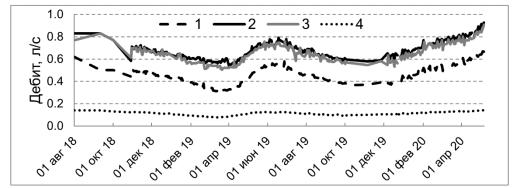


Рис. 1. Изменение дебита скважин на месторождении «Марциальные воды» в 2018–2020 гг.

Λ	имический соста	ав марциальных вс	од в 2018—2020 гг.	(n - 24)
Показатель—	Скважина 1	Скважина 2	Скважина 3	Сквах
Hokasarenb				

Показатель	Ск	важин	a 1	Ск	важин	a 2	Скі	важин	1a 3	Cı	кважиі	1a 4
компонент,	_	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max
рН	6.4	6.3	6.4	6.2	6.1	6.3	6.0	6.0	6.1	6.1	6.0	6.1
Eh, mV	192	175	236	201	186	240	206	198	230	203	186	221
$Na^+$	3.7	3.3	4.5	4.7	4.2	6.7	5.1	4.5	6.8	5.8	5.3	6.1
$K^{+}$	2.5	2.2	2.9	4.2	3.6	4.9	4.5	3.4	5.4	6.4	4.6	7.3
$Ca^{2+}$	30	24	34	46	43	51	46	43	51	67	60	78
$Mg^{2+}$	14	14	16	27	26	28	34	32	38	57	52	67
Fe <sup>2+</sup>	15	13	17	45	41	49	67	64	71	129	116	137
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	104	99	108	113	92	120	96	73	101	112	109	117
$Cl^-$	1.0	0.9	1.4	1.4	1.2	1.8	1.9	1.7	2.2	5.3	5.0	6.2
$SO_4^{2-}$	83	78	87	219	180	238	294	230	321	530	489	602
$SiO_2$	18	15	24	22	17	26	25	20	30	22	16	25
CO <sub>2</sub>	100	94	103	187	176	197	243	227	253	345	334	363
Формула	$M0.3 - \frac{I}{2}$	$HCO_350$	SO <sub>4</sub> 49	$M0.5^{-5}$	60 <sub>4</sub> 69 <i>H</i> C	CO <sub>3</sub> 30	M0.6-S	SO <sub>4</sub> 76H	CO <sub>3</sub> 22	M0.9-	SO <sub>4</sub> 821	HCO <sub>3</sub> 16
Курлова	C	'a41Mg3	86 <i>Fe</i> 16	$\Lambda$	1g36Ca3:	5 <i>Fe</i> 24		1g36Fe		W U.9-		e35Ca25

Железистые подземные воды широко распространены в гидросфере, но Марциальные воды — это уникальное явление, так как нахождение железа полностью в форме  $Fe^{2+}$  делает их лечебными, а при высоком содержании железа (15–130 мг/л) воды имеют низкую общую минерализацию -0.3-0.9 г/л и близкую к нейтральной величину pH = 6.0-6.4. Для Марциальных вод по мере роста минерализации наблюдается смена в анионном составе гидрокарбонатов на сульфаты, а в катионном – кальция на магний и железо (таблица). Удержанию железа в растворе способствуют повышенные содержания СО2. При общем газосодержании 60-80 мл/л доля  $CO_2 = 72-76$  об. %, что необычно велико для подземных вод региона. Рост содержаний СО<sub>2</sub>, вероятно, является результатом сернокислотного выщелачивания пород, но не исключены и процессы биогенной сульфатредукции, не достигающие стадии  $H_2S$ , на что косвенно указывает обеднение карбонатной системы углеродом-13 [2] и смещения в изотопном составе железа [3].

Единственным существенным источником железа в инфильтрогенных водах кристаллического щита являются сульфиды. В случае Марциальных вод окисляются сульфиды, широко представленные в углеродистых (шунгитсодержащих) породах палеопротерозоя [4]. Скорость окисления сульфидов в значительной степени определяется их морфологией; в частности, наиболее реакционно активен фрамбоидный пирит — агрегаты микрокристаллов размером 1–10 мкм и менее. Фрамбоиды пирита и признаки жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий весьма характерны для органического вещества шунгитов изучаемого района [5].

Для Марциальных вод теоретически возможно как современное окисление сульфидов, так и их окисление в прошлом при дефиците воды в зонах аэрации в период последнего климатического похолодания, когда происходило снижение базиса эрозии и осушение верхней части разреза. На несколько большую вероятность второго варианта указывает широко развитое замещение пирита ярозитом [5]. Это означает, что возможно современное растворение уже накопленных ранее продуктов окисления [6, 7] при текущем окислении сульфидов только в той части геологического разреза, где для подземных вод характерно существование растворенного кислорода. Еще в ходе разведки месторождения Е. Рентгартен предположил, что значительная концентрация железа в воде объясняется не столько современным окислением пирита, сколько «...процессом выщелачивания древних продуктов окисления пирита из сланцев водой, циркулирующей в коренных породах в настоящее время» [8]. В пользу второго предположения свидетельствуют также многочисленные наблюдения сульфатных кор выветривания по сульфидным рудам в зоне современного развития многолетнемерзлых пород [9–11].

На возможность криогенной природы продуктов окисления сульфидов и их накопления в области питания Марциальных вод указывают палеореконструкции рассматриваемой территории. В период последнего оледенения в пределах Онежской структуры господствовали сухие морозные условия с глубоким залеганием подземных вод, обусловленным падением регионального базиса эрозии и отсутствием сплошного ледникового покрова. Дефицит жидких осадков в холодном климате способствовал сохранению и накоплению продуктов окисления сульфидов. Эволюция гидрогеологической системы началась с потеплением, а постоянный водоносный горизонт сформировался в конце пребореала. В голоцене область питания Марциальных вод оставалась на суше, в то время как долина Габозера (область разгрузки) находилась под водой до конца пребореала [12].

Нами исследована торфяная залежь в долине Габозера. Возраст подошвы торфяной залежи, куда происходило поступление минеральной воды в прошлом, 9640±150 лет. В разрезе торфяных отложений измерены вариации изотопного отношения $^{234}$ U/ $^{238}$ U = 1.4–2.2 (по активностям). Для Марциальной воды это отношение составляло 3-4 в 1979 г. [2] и 0.78-1.51 в 2005 г. [6]. Заметное превышение содержаний урана-234 над равновесными значениями в воде и гидрогенных образованиях (в торфе основным носителем урана являются гидроокислы железа) свидетельствует, по гипотезе авторов, об участии талых (в результате протаивания мерзлых пород и подземных льдов) вод в формировании подземного стока [13, 14]. Указанный эффект обусловлен тем, что в период валдайского оледенения при отсутствии жидкой воды уран-234 в составе пород возникал и сохранялся как естественный член радиоактивной цепочки  $^{238}\mathrm{U} \rightarrow ... \rightarrow ^{206}\mathrm{Pb}$ . Поскольку  $^{234}\mathrm{U}$  находится в сочлененных треках α-частиц и ядер отдачи <sup>234</sup>Th и практически весь представлен водорастворимой формой в степени окисления 6+, в голоцене в процессе вытаивания подземных льдов происходило преимущественное выщелачивание урана-234 талыми водами за счет его повышенной геохимической мобильности. По мере исчерпания доступного запаса урана-234 в минеральной матрице водовмещающих пород изотопный состав урана в воде и гидрогенных образованиях возвращается к равновесным значениям, а в некоторых случаях

даже возникает его дефицит. Для отдельных районов подтверждение этому механизму было получено при комплексном изучении подземных вод, включавшем определение  $\delta^{18}$ O,  $\delta^{2}$ H,  $^{234}$ U/ $^{238}$ U и гелиевое датирование [15, 16]. Иными словами, использование данного трассера может дать основания для диагностики процессов протаивания мерзлых пород в настоящее время и оценки глубины промерзания разреза в ледниковые эпохи. В вертикальном разрезе торфяной толщи обнаружена обратная корреляция между содержанием железа и избытком урана-234. Последнее вызвано интенсификацией выноса железа при возникновении восстановительных условий и, наоборот, замедлением темпов миграции урана в этой обстановке [12].

Возможность питания за счет подземных вод протаивающих мерзлых пород в какие-то периоды существования гидрогеологической системы Марциальных вод подтверждают наблюдения за изотопным составом воды (содержаниями дейтерия и кислорода-18). По данным опробования в конце 1970-х годов обнаруживалось значительное отклонение величин  $\delta^{18}$ O,  $\delta^{2}$ H относительно линии метеорных вод [2, 6], а в настоящее время состав близок к современным атмосферным осадкам (рис. 2).

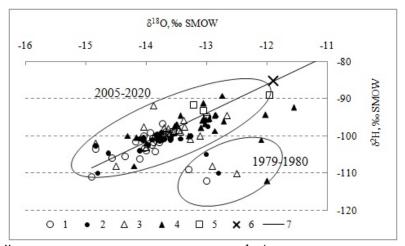


Рис. 2. Изотопный состав воды минеральных вод: 1-4 — скважины курорта «Марциальные воды» (шифр соответствует номеру эксплуатационной скважины в таблице, овалами ограничены данные за различные периоды времени); 5 — родники, 6 — взвешенный среднегодовой состав атмосферных осадков; 7 — локальная линия метеорных вод.

Обнаруживаемое в прошлом отклонение величин  $\delta^{18}$ О,  $\delta^{2}$ Н относительно состава, естественного для вод инфильтрационного происхождения (соответствующего линии метеорных вод), может быть объяснено неравновесным изотопным фракционированием. Известно, что в ходе замерзания лед обогащается дейтерием и кислородом-18 относительно исходной воды (при таянии фракционирования не происходит вследствие малых скоростей диффузии молекул  $H_2$ О во льду). На диаграмме  $\delta^2$ H vs.  $\delta^{18}$ О этот эффект выражается в смещении фигуративных точек для льда вправо и вверх относительно начального положения воды на линии метеорных вод. Начальный изотопный состав воды (до ее замерзания в ходе становления мерзлоты) по данным опробования 1979–1980 гг. может быть оценен ориентировочно как  $\delta^2$ H < -120 ‰ и  $\delta^{18}$ O < -16 ‰, что соответствует весьма холодным климатическим условиям в период поступления этих вод в подземную гидросферу.

Заметные различия в химическом и изотопном составе воды четырех скважин соответствуют существенной разнице возрастов этих вод, оцененных тритий/гелий-3 методом [17]. В первую очередь это обусловлено трещинным режимом фильтрации и, повидимому, заметно различающимися путями движения воды от области питания. В частности, изотопный состав гелия (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He) и неон/гелиевое отношение (<sup>20</sup>Ne/<sup>4</sup>He) указывают на смешение «молодой», содержащей тритий и тритигенный гелий-3, а также «древней», содержащей повышенные концентрации теригенного гелия-3 и гелия-4, компоненты подземных вод. Результаты наблюдений 1989 г. и 2013 г. указывают на то, что

доля «древней» компоненты постепенно уменьшается, составляя в настоящее время несколько процентов по объему. Тритий/гелий-3 датирование дает для «молодой» компоненты в 2013 г. возраст около 35–45 лет [17].

Обнаруженные изменения в химическом и изотопном составе воды можно объяснить увеличением интенсивности инфильтрации вблизи участка эксплуатации вследствие строительства санатория и поселка в области питания (за счет планировки территории, организации фундаментов, дорог, траншей под водопровод и канализацию и т.п.). Возможно также, что интенсификация разгрузки минеральной воды при переходе на эксплуатацию месторождения скважинами вместо каптажа естественных родников имела следствием ускоренное извлечение «реликтовых» подземных вод протаивающих мерзлых толщ, в результате чего минеральные воды обрели практически инфильтрационный облик.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-45-100004 и РНФ, проекты № 18-17-00176 и 20-77-10057.

- 1. Бородулина Г.С., Токарев И.В., Левичев М.А. Первому русскому курорту 300 лет. История изучения Марциальных вод // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2019. № 4. С. 76–82.
  - 2. Ресурсы и геохимия подземных вод Карелии. Петрозаводск, 1987. 151 с.
- 3. Дубинина Г.А., Сорокина А.Ю., Гапеева М.В., Долотов А.В. Сообщества нейтрофильных железоокисляющих микроорганизмов железистых источников различного генезиса и их участие в фракционировании стабильных изотопов железа // Микробиология. 2012. Т. 81, № 1. С. 96–104.
- 4. Бородулина Г.С., Светов С.А., Токарев И.В., Левичев М.А. Роль высокоуглеродистых (шунгитсодержащих) пород в формировании состава подземных вод Онежской структуры // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 72–87.
- 5. Филиппов М.М., Дейнес Ю.Е. Субпластовый тип месторождений шунгитов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 261 с.
- 6. Токарев И.В., Бородулина Г.С., Блаженникова И.В., Авраменко И.А. Условия формирования железистых минеральных вод по изотопно-геохимическим данным (курорт «Марциальные воды», Карелия) // Геохимия. 2015. № 1, С. 88–91.
- 7. Tokarev I.V., Borodulina G.S., Subetto D.A., Voronyuk G.Y., Zobkov M.B. Fingerprint of the geographic and climate evolution of the Baltic–White Searegion in the Late Pleistocene-Holocene in groundwater stable isotopes (<sup>2</sup>H, <sup>18</sup>O) // Quaternary International. 2019. Vol. 524. P.76–85.
  - 8. Лечебные местности Карелии. Изд. Наркомздрава АКССР, 1935. 188 с.
- 9. Птицын А.Б. Геохимические основы геотехнологии металлов в условиях мерзлоты. Новосибирск: Наука, 1992. 120 с.
- 10. Elberling B., Schippers A., Sand W. Bacterial and chemical oxidation of pyritic mine tailings at low temperatures // Journal of Contaminant Hydrology. 2000. № 41. P. 225–238.
- 11. Юргенсон Г. А. Зона окисления в многолетнемерзлых породах // Записки ВМО. 1997. Ч. 126. № 5. С. 15–27.
- 12. Borodulina G., Tokarev I., Levichev M., Yakovlev E., Kamensky I., Skiba V. Paleoenvironmental reconstruction for mineral groundwater area Marcial Waters (Lake Onega catchment) // Limnology and Freshwater Biology. 2020. Vol. 4. P. 472–473.
- 13. Tokarev I.V., Zubkov A.A., Rumynin V.G., Polyakov V.A., KuznetsovV.Yu, Maksimov F.E., Origin of high <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U ratio in post-permafrost aquifers // Uranium in the Environment (Mining Impact and Consequences). Freiberg. Springer: 2006. P. 854–863.
- 14. Токарев И.В. Использование изотопных данных ( $\delta^2$ H,  $\delta^{18}$ O,  $^{234}$ U/ $^{238}$ U) при изучении процессов деградации мерзлоты в результате долговременных вариаций климата // Записки Горного института. 2008. Т. 176. С. 191–195.
- 15. Токарев И.В., Зубков А.А., Румынин В.Г., Поздняков С.П., Поляков В.А., Кузнецов В.Ю. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 1. Палеореконструкция условий формирования подземных вод // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 2. С. 219–227.
- 16. Токарев И.В., Зубков А.А., Румынин В.Г., Поздняков С.П. Оценка долгосрочной безопасности захоронения радиоактивных отходов. 2) Исследование водообмена в многослойной системе изотопными методами // Водные ресурсы. 2009. Т. 36. № 3. С. 363–374.
- 17. Бородулина Г.С., Каменский И.Л., Скиба В.И., Токарев И.В. Закономерности формирования железистых минеральных вод курорта «Марциальные воды» (Карелия) по благородным газам ( ${}^{3}$ He/ ${}^{4}$ He,  ${}^{20}$ Ne/ ${}^{4}$ He) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. Т. 17. С. 61–65.

### ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ТАЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-152-156

Брагин И.В.  $^1$ , Челноков Г.А.  $^2$ , Харитонова Н.А.  $^3$ , Павлов А.А.  $^1$ , Вельдемар А.А.  $^1$   $^1$ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, bragin\_ivan@mail.ru  $^2$  Геологический институт РАН, Москва, geowater@mail.ru  $^3$  Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, tchenat@mail.ru

**Аннотация**: В работе представлены результаты изучения химического состава термальных вод и вмещающих их горных пород Тальского месторождения. Новые данные по редкоземельным элементам свидетельствуют о фракционировании исходного расплава при формировании различных комплексов. Содержания РЗЭ в воде крайне низки, а профиль их распределения отражает особенности формирования уникальных термальных вод.

**Ключевые слова**: термальные воды, взаимодействие вода – порода, РЗЭ.

**Abstract**: The paper presents the results of studying the chemical composition of thermal waters and the host rocks of the Talaya deposit. New data on rare earth elements indicate the fractionation of the initial melt during the formation of various complexes. The REE content in water is extremely low, and the profile of their distribution reflects the peculiarities of the formation of unique thermal waters.

**Key words**: thermal waters, water-rock interaction, REE.

Термальные воды Дальнего Востока России известны уже более ста лет и привлекают внимание как недропользователей, так и исследователей. Стоит, несомненно, отметить работы по подземным водам северо-востока России [1–5], которые в основном имеют гидрологическую и гидрогеологическую направленность. Несмотря на наличие комплексных работ по термам Дальнего Востока [3, 6, 7], термальные воды Магаданской области остались без должного внимания.

Месторождение термальных вод «Талая» находится в Хасынском районе Магаданской области в 270 км на север от г. Магадана (рис. 1), в верховьях реки Талой (левый приток реки Буюнды). На сегодняшний день на месторождении действует санаторий регионального значения «Курорт Талая». С областным центром курорт связывает автомобильная грунтовая дорога удовлетворительного качества. По направлению Магадан — Талая — Магадан ежедневно ходит автобус, что говорит о востребованности курорта на данной территории и его доступности для жителей Магаданской области.

В 2018 г. нами были изучены фондовые материалы, а в два осенних полевых сезона 2018—2019 гг. проведены геолого-гидрохимические обследования на месторождении «Талая», включавшие как гидрохимическое опробование термальных и фоновых вод, так и отбор водовмещающих пород. Методика пробоотбора и комплексного аналитического подхода подробно описана в наших предыдущих работах [7]. Все анализы выполнялись в сертифицированных лабораториях ЦКП ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток).

Термальные воды Тальского месторождения приурочены к осадочным отложениям верхнего триаса — нижней юры, прорванным туфоэффузивными породами нижнего — верхнего мела, и сверху перекрыты рыхлыми ледниковыми отложениями четвертичного периода. Мощность толщи верхнетриасовых Карнийских сланцев определяется в среднем в 400–500 м, доходя до 800–1000 м. Толща интенсивно дислоцирована с образованием складок северо-западного и юго-восточного простирания. Осадочные отложения нижней юры представлены песчаниками, алевролитами и алевро-глинистыми сланцами Геттангского, Синемюрского, Плисбахского и Тоарского ярусов различной мощности, залегающих в основном согласно. Выходы толщи на дневную поверхность наблюдаются на юго-востоке и юго-западе по склонам руч. Кривого и на северо-востоке на водоразделе между р. Талой и р. Буюнды. Верхнетриасовая — нижнеюрская осадочная толща прорывается серией верхнемеловых эффузивов Ольской свиты, представленных риолитами и их туфами, срезанными эрозионными процессами. Наибольшим распространением в районе указанная

свита пользуется на водоразделах в 3—4 км к югу — юго-западу от месторождения. Примерно в 3 км на восток от месторождения площадь прорывается раннемеловыми гранодиоритами, сиенит-диоритами. В северо-восточном направлении с данной интрузией связаны грейзены. Однако они находятся на удалении от месторождения и на геологической карте отображения не получили [8].

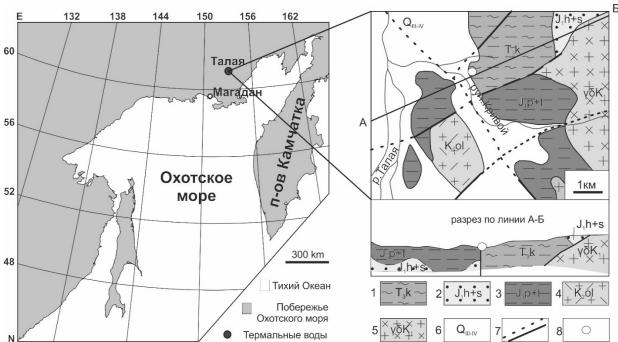


Рис. 1. Расположение и геологическое строение Тальского месторождения термальных вод по [6], с изменениями. I — верхний триас, Карнийский ярус, глинистые сланцы, алевролиты (обр. № ТЛ-11); 2 — нижняя юра, Геттангский и Синемюрский ярусы, песчаники и алевролиты (обр. № ТЛ-14); 3 — нижняя юра, Плинсбахский и Тоарский ярусы, алевро-глинистые сланцы, алевролиты, песчаники; 4 — верхний мел, Ольская свита, риолиты и их туфы, игнимбриты, витрофиры (обр. № ТЛ-12); 5 — нижнемеловые интрузивы, гранодиориты, сиенито-диориты (обр. № ТЛ-13); 6 — четвертичная система, галечники, пески, суглинки; 7 — тектонические разломы (предполагаемые и достоверные); 8 — скважина «Центральная».

Все описанные породы в районе покрываются рыхлыми отложениями четвертичного периода как ледникового, так и межледникового происхождения. Мощность их варьируется в зависимости от рельефа и достигает 40–50 м непосредственно на термальной площадке месторождения. Верхние горизонты описываемых пород представлены преимущественно галечниками и гравийно-галечными отложениями, в нижних горизонтах преобладают более мелкие фракции, выражающиеся разнозернистыми песками, супесями и суглинками.

В гидрогеологическом отношении район представляет большой интерес как в смысле морфологии устойчиво талых водоносных комплексов и условий образования грунтовых вод, так и в отношении уровенного и термохимичесного режима последнего. Сложность гидрогеологических условий района состоит в том, что они формируются под активным воздействием двух резко контрастных физико-геологических факторов: вечной мерзлоты, предельно ограничивающей развитие устойчивых водоносных горизонтов, и постоянных (иногда мощных) тепловых потоков, поднимающихся из недр земли (вместе с холодными и тектоническим трещинам. Постоянные имири водами) ПО грунтовые распространены только в пределах депрессионных площадей, каковыми являются участки речных долин и распадков. На площадях, несущих положительные формы рельефа, имеют сезонные грунтовые воды, приуроченные к деятельному слою. Наиболее водообильным и легкодоступным водоносным комплексом является аллювий долины

р. Талой, где устойчивые водоносные талики пользуются широким распространением как в горизонтальных направлениях, так и по вертикали. В питании грунтовых вод района принимают участие и атмосферные, и глубинные воды. По условиям залегания все воды района разделяются на воды рыхлых отложений и трещинные воды. Первые являются преимущественно холодными, иногда теплыми, пресными, вторые — преимущественно горячими, иногда холодными, минеральными [8].

В таблице представлены результаты анализа химического состава подземных вод Тальского месторождения, как полученные из фондовых материалов [8], так и авторские, полученные при проведении полевых работ. В момент введения в эксплуатацию термальные воды Тальского месторождения по ионному составу относились к хлоридногидрокарбонатным натриевым водам с повышенным содержанием кремния (до 94 мг/л  $H_2SiO_3$ ), щелочной реакцией (pH = 9) и низкой минерализацией (450 <TDS <477 мг/л) (таблица). Состав типичен для азотных термальных вод, таких как Кульдур, Тумнин, Анненские, Чистоводное, Амгу и других.

Результаты определения основных ионов и физико-химических параметров вод Тальского

месторождения

Элемент анализа	Ед.изм.	Талая,	Талая,	Талая, скв.	Река Талая
		скв. 15 [8]	скв.62 [8]	«Центральная»	
Химический тип	_	Na Cl-HCO <sub>3</sub>	Na Cl-HCO <sub>3</sub>	Na HCO <sub>3</sub> -Cl-SO <sub>4</sub>	Ca HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub>
Минерализация		475	477	980	62
$[Na^+]$		124.2	117.5	200	1.95
$[K^+]$				12.7	0.34
$[Ca^{2+}]$		2.1	3.0	11.1	6.21
$[\mathrm{Mg}^{2^+}]$	200/2	0.9	0.5	0.2	0.55
[F <sup>-</sup> ]	$M\Gamma/\Pi$	_	_	16.8	_
[Cl <sup>-</sup> ]		81	77	56.5	0.31
[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]+[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> ]		128	121	84	10.2
$[SO_4^{2-}]$		27.2	20.9	282	10.4
$H_2SiO_3$		94.4	94.1	151.7	10.8
pН	_	9	9	8.69	5.75
Eh	мВ	_	_	-82	423

Однако наши данные, полученные в 2018 г., свидетельствуют об изменении состава по мере эксплуатации месторождения, вызванном, возможно, увеличением водоотбора либо обветшанием конструкции скважины. По химическому типу воды относятся к гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатным натриевым с повышенным содержанием кремния (до 151.9 мг/л  $H_2SiO_3$ ) и в два раза увеличившейся минерализацией (до 980 мг/л). Реакция среды восстановительная (Eh = -82 мВ) [9]. Из таблицы можно проследить изменение состава термальных вод месторождения в разные годы, а также сравнить его с поверхностными водами (р. Талая), формирующими свой состав на водоразделах в меловых андезитах и риолитах. Отмечаются также повышенные содержания лития, фтор-иона, бора, а также бериллия и мышьяка. Присутствие сульфатов в фоновых подземных водах может свидетельствовать о вовлечении их в питание термальных вод.

Концентрации тех или иных химических элементов в растворе определяются особенностями питания и дальнейшего изменения состава термальных вод под действием процессов, происходящих во вмещающих их горных породах. Поскольку общая минерализация вод по нашим данным небольшая (менее 1 г/л), сложно предполагать влияние каких-либо захороненных рассолов или криопэгов. Стоит отметить, что состав вод немного нетипичен для азотных вод, поскольку для этих терм характерна минерализация менее 0.5 г/л и гидрокарбонатный, хлоридно-гидрокарбонатный хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатный натриевый состав [7]. Тем не менее, формируя свой состав в осадочных породах, воды

Тальского месторождения обогащаются сульфат-ионом, поступающим при растворении пирита и пирротина вмещающих пород.

Данные по содержанию РЗЭ в водах и вмещающих породах представлены на рисунке 2. Для большинства вмещающих пород виден ровный профиль распределения. Следует отметить положительную цериевую и отрицательную европиевую аномалии для образца риолитов (ТЛ-12). Из геологического очерка известно, что граниты (ТЛ-13) и риолиты (ТЛ-12) формировались из одного расплава, поэтому можно сделать вывод о фракционировании церия и европия при внедрении интрузии и последовательной кристаллизации сначала гранитов, затем риолитов.

Профиль распределения P39 в р. Талой типичен для поверхностных вод [10]. Отрицательная цериевая аномалия отражает окислительную обстановку (Eh=423 mV), способствующую окислению церия до  $Ce^{4+}$ , который менее подвижен в растворе из-за лучшей способности к комплексообразованию, и последующему высаждению со вторичными минералами.

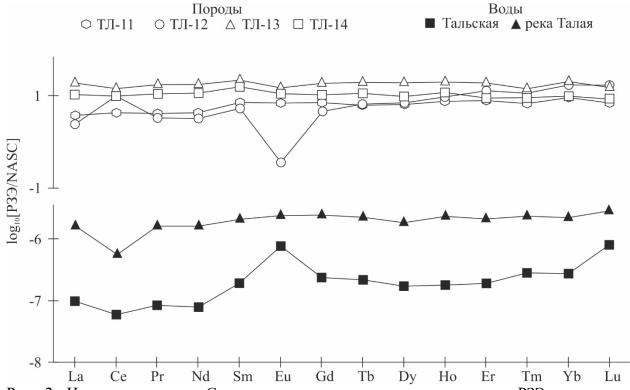


Рис. 2. Нормированные к Североамериканскому сланцу содержания РЗЭ в водах и вмещающих горных породах Тальского месторождения.

Содержания РЗЭ в термальной воде очень низкие, на уровне ppb и ppt. Это характерно для щелочных низкоминерализованных терм [6, 7]. Распределение отличается накоплением тяжелых РЗЭ, положительной европиевой и отрицательной цериевой аномалией. Несмотря на отсутствие положительного кларка европия во вмещающих породах, наблюдается пик на европии для термальной воды, что может свидетельствовать об активном выщелачивании его из плагиоклазов гранитов (ТЛ-13) или риолитов (ТЛ-12). Дальнейшие исследования редкоземельных элементов должны быть направлены в сторону изучения содержаний в монофракциях основных породообразующих минералов (плагиоклазов, КПШ), активно участвующих во взаимодействии с вмещаемой водой.

### Заключение

Изученные термальные воды Тальского месторождения являются уникальным объектом, расположенным в близполярном районе Дальнего Востока России. Особенности геологического развития наряду с неотектоническими подвижками территории создали гидрогеологические и геотермические условия для формирования одного из крупнейших

месторождений термальных вод в регионе. Новые данные по содержанию РЗЭ позволили более точко охарактеризовать особенности формирования химического состава термальных вод.

Исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (грант №18-77-10007).

- 1. Глотов В.Е., Иванов В.В. Характер гидрогеохимической зональности в разнотипных осадочных бассейнах северо-востока СССР // Геология нефти и газа. 1982. № 4. С. 35–39.
- 2. Глотов В.Е., Глотова Л.П., Гидрогеология северной береговой зоны Охотского моря // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 6. С. 31–42.
- 3. Поляк Б.Г., Дубинина Е.О., Лаврушин В.Ю., Чешко А.Л. Изотопный состав воды гидротерм Чукотки // Литология и полезные ископаемые. 2008. № 5. С. 480–504.
- 4. Гольдман В.Г. К вопросу о формировании береговых терм северо-востока СССР // Формирование и геохимия подземных вод Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука. 1967.
- 5. Калабин А.И., Вечная мерзлота и гидрогеология северо-востока СССР. Труды ВНИИ-1,. 1960. Т. 28, 470 с.
- 6. Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонова Н.А., Александров И.А., Ивин В.В., Челнокова Б.И. Геохимия и условия формирования Ульского термального источника (Охотоморское побережье, Хабаровский край) // Тихоокеанская геология. 2019. Т. 38, № 2. С. 73–85.
- 7. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Kharitonova N.A., Vysotskiy S.V. Geochemistry of thermal waters of continental margin of Far East of Russia Acta geologica sinica. 2016. 90 (1). P. 276–284.
- 8. Сопин П.А. Отчёт Тальской гидрогеологической партии по работам на Тальском горячем источнике и в районе санатория «Горячие ключи». Магадан, 1949.
- 9. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A., Veldemar A.A., Pavlov A.A. Rare-earth elements and isotopic geochemistry of thermal waters of the Okhotsk sea shore, Far East of Russia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. 467. 012092.
- 10. Чудаев О.В., Челноков Г.А., Брагин И.В., Харитонова Н.А., Блохин М.Г., Александров И.А. Фракционирование редкоземельных элементов в реках Восточного и Южного Сихотэ-Алиня в условиях природных и антропогенных аномалий // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34, № 6. С. 34—44.

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА И КИСЛОРОДА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ г. КАЗАНИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-157-161

### Петрова Д.И.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, DaIPetrova@kpfu.ru

Аннотация: С целью исследования гидрогеологических условий изучен изотопный состав кислорода и водорода больших и малых речных водотоков, скважин забора питьевых вод. Согласно полученным данным, впервые определена линия метеорных вод для города Казани. Приводятся первые результаты изотопных исследований (водород, кислород) поверхностных и подземных вод на территории Казани. Показано, что подземные воды связаны с атмосферными осадками и слабо испаряются во время инфильтрации. Поверхностные воды обогащены более тяжелыми изотопами (среднее  $\delta D - 86.3~\%$ ,  $\delta^{18}O - 10.9~\%$ ) по сравнению с подземными (среднее  $\delta D - 103.3~\%$ ,  $\delta^{18}O - 13.9~\%$ ). По изотопному составу выявлена связь между поверхностными водами р. Солонка и оз. Голубого с подземными водами родника «Аки».

Ключевые слова: гидросфера, изотопы, кислород, водород, Казань

**Abstract**: In order to study the hydrogeological conditions, the isotopic composition of oxygen and hydrogen of large and small river streams, wells for drinking water intake has been studied. According to the data obtained, the line of meteoric waters for the city of Kazan was determined for the first time. The first results of isotopic studies (hydrogen, oxygen) of surface and ground waters on the territory of Kazan are presented. It is shown that groundwater is associated with precipitation and weakly evaporates during infiltration. Surface waters are enriched in heavier isotopes (with average  $\delta D$  –86.3 %,  $\delta 18O$  –10.9 %), compared with underground (average  $\delta D$  –103.3 %,  $\delta 18O$  –13.9 %). The isotopic composition revealed a relationship between the surface waters of the river. Salt cellar and lake Blue with underground waters of the "Aki" spring.

Key words: hydrosphere, isotopes, oxygen, hydrogen, Kazan

Город Казань – столица Республики Татарстан – является крупным портом и одним из крупнейших экономических, политических, научных, образовательных, культурных и спортивных центров России с населением более 1.2 миллиона жителей. Город расположен на левобережье р. Волги и созданного в середине прошлого века крупнейшего в Евразии Куйбышевского водохранилища. Кроме р. Волги по территории Казани протекает р. Казанка (левый приток Волги) и малые реки Нокса, Солонка, Киндерка. Важной частью гидрографической сети и общего ландшафта города являются озера (Кабан, Лебяжье, Глубокое, Голубое и др.), имеющие карстовое, старичное и техногенное происхождения [1]. В настоящее время 84 % хозяйственно-питьевого водоснабжения Казани осуществляется из поверхностного водозабора «Волжский» на берегу Куйбышевского водохранилища, а остальная часть городского водоснабжения приходится на скважинные водозаборы, которые эксплуатируют подземные воды четвертичного, неогенового и пермского (казанский и сакмарский) водоносных комплексов на глубине до 200 м.

Водоносный четвертичный аллювиальный комплекс залегает первым от поверхности, объединяя отложения поймы и четырех надпойменных террас современной Волги, отложения озер и болот. Подземные воды комплекса относятся к гидрокарбонатному магниево-кальциевому типу пресных вод с преимущественной минерализацией  $0.2-0.3 \, г/л$ .

Водоносный неогеновый аллювиальный комплекс объединяет отложения палеоВолги. Подземные воды комплекса представлены гидрокарбонатными магниево-кальциевыми пресными водами с минерализацией 0.3-0.5~г/л. В пределах погребенной палеодолины общая жесткость и минерализация подземных вод постепенно повышаются вниз по разрезу, достигая, соответственно, значений 7-10~°Ж и 0.6-0.8~г/л.

Водоносный казанский карбонатно-терригенный комплекс распространен повсеместно, исключая глубокие эрозионные врезы палеодолины Волги. Питание комплекса происходит в основном за счет перетекания вод из вышезалегающих водоносных горизонтов, а также за счет подтока вод из нижнепермских водоносных горизонтов в местах их разгрузки по долинам рек. Это приводит к тому, что минерализация подземных вод казанского водоносного комплекса преимущественно составляет  $0.5-1.0 \, г/л$ , а на приречных участках достигает значений  $2.3-2.5 \, г/л$ . В связи с этим в направлении от водоразделов к

рекам происходит и изменение типа вод от гидрокарбонатного кальциево-магниевого до сульфатного кальциевого, реже – хлоридно-сульфатного.

Водоносный сакмарский сульфатно-карбонатный комплекс распространен повсеместно, исключая отдельные глубокие эрозионные врезы палеодолины р. Волги. По химическому типу воды комплекса гидрокарбонатно-сульфатные или сульфатные магниево-кальциевые, натриево-кальциевые, кальциевые, слабоминерализованные (1.1–3.0~г/л) с общей жесткостью до  $28–36~^{\circ}\text{Ж}$ . За счет перетоков вод сверху вниз на прилегающих к склонам палеодолин участках происходит опреснение вод комплекса до 0.3–1.0~г/л. Воды по составу становятся гидрокарбонатными либо сульфатно-гидрокарбонатными кальциевомагниевыми, а их общая жесткость снижается до  $4–12~^{\circ}\text{Ж}$ . Такие воды встречаются, например, на западной окраине г. Казани под мощным кайнозойским аллювиальным комплексом.

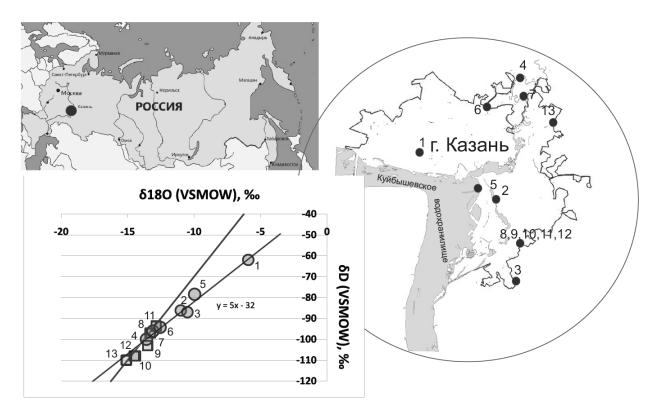
Исследования поверхностной гидросферы (реки, озера, Кубышевское водохранилище) на территории Казани выявили широкие вариации значений минерализации. Выделяются пресные (с минерализацией 0.07–0.9 г/л) воды гидрокарбонатного, гидрокарбонатносульфатного состава и слабоминерализованные (с минерализацией до 2.5–3.2 г/л) сульфатные кальциевые воды. Так, река Солонка и Голубое озеро имеют смешанное питание со значительной долей подземного стока (преимущественно за счет растворения карбонатносульфатных пермских пород), вследствие чего наблюдается повышенная минерализация вод. Река Казанка, приустьевая часть которой находится в центре Казани, имеет смешанное питание с преобладанием снегового и дождевого (более 70 %). Вода относится к гидрокарбнатно-сульфатным кальциевым, а ее минерализация достигает 1 г/л, что связано с техногенно-антропогенным прессом на долину р. Казанка.

В последние годы неотъемлемой частью при изучении гидросферы становятся изотопные исследования подземных и поверхностных вод. Особенно часто используются данные об изотопном составе водорода  $\delta D$  ( $^2H^{/1}H$ ) и кислорода  $\delta^{18}O$  ( $^{18}O^{/16}O$ ). Автором для изучения условий формирования гидросферы Казани использованы данные об изотопном составе  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ , полученные в результате опробования поверхностных вод (рисунок). Пробы образцов воды из рек и озер отобраны в октябре 2019 г. с глубины 1-2 м ручным перистальтическим насосом. Далее пробы фильтровались через мембранные фильтры (0.45 мкм) и разливались по пластиковым бутылкам. Подземная гидросфера Казани охарактеризована пробами из родника «Аки» (пермский водоносный комплекс) и скважин водозабора «Мирный», вскрывающих неогеновый и пермский водоносные комплексы (рисунок). Определения значений стабильных изотопов водорода и кислорода в пробах воды выполнены в Казанском федеральном университете с использованием изотопного массспектрометра Delta V Plus (Thermo Fisher Scientific, Германия) с приставкой GasBench II в режиме постоянного потока (аналитики Б.И. Гареев и Г.А. Баталин).

Результаты определения содержаний водорода и кислорода приведены в таблице относительно международного стандарта VSMOW (таблица). Значения содержания изотопов  $\delta^{18}$ О в озерах изменяются от -13.58 до -5.92 ‰,  $\delta D$  от -99.97 до -61.95 ‰, дейтериевый эксцесс ( $d_{exc}$ ) от -14.6 до 8.7 ‰. Значения содержания изотопов  $\delta^{18}$ О в реках изменяются от -13.10 до -9.96 ‰,  $\delta D$  от -94.26 до -78.43 ‰,  $d_{exc}$  от -1.2 до 8.7 ‰. В подземных водах неогенового и пермского (казанского) комплексов содержания изотопов  $\delta^{18}$ О изменяются от -15.10 до -12.85 ‰,  $\delta D$  от -110.0 до -93.67 ‰,  $d_{exc}$  — от 5 до 10.9 ‰. Значения изотопов в гидросфере г. Казань варьируются в широком диапазоне:  $\delta D$  изменяется от -61.95 до -110 ‰, а  $\delta^{18}$ О — от -5.92 до -15.1. Как следует из анализа изотопных данных (рисунок, таблица) отчетливо различаются подземные и поверхностные воды г. Казани. Для первых характерны более легкие значения стабильных изотопов (среднее  $\delta D$  -103.3 ‰,  $\delta^{18}$ О -13.9 ‰), а для поверхностных вод — более тяжелые значения (среднее  $\delta D$  -86.3 ‰,  $\delta^{18}$ О -10.9 ‰). Отдельно в пределах подземных вод изотопные различия в пермских и неогеновых водоносных комплексах не выявлены. По изотопному составу выявлена связь между поверхностными водами р. Солонка и оз. Голубого с подземными водами родника «Аки»,

что, по-видимому, подтверждает ланшафтно-гидрологические и геологические особенности. В частности, изотопные данные свидетельствуют в пользу большой доли подземных вод в водном балансе поверхностных вод р. Солонка и оз. Голубого.

В целом, полученные данные свидетельствуют о медленной нисходящей фильтрации атмосферных осадков по проницаемым зонам осадочных пород; латеральное движение подземных вод также, по-видимому, происходит медленно.



Места отбора проб на территории Казани и изотопный состав гидросферы. Верхняя линия – GMWL [2]; нижняя линия – LMWL; кружки на графике – поверхностные воды; квадраты – подземные воды; расшифровку номеров проб см. в таблице.

60 лет назад X. Крэйг [2] выявил зависимость изотопов водорода и кислорода атмосферных осадков, известную как глобальная линия метеорных вод (Global Meteoric Water Line – GMWL):  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18} O + 10$ . Однако при дальнейшем анализе в различных климатических условиях было установлено, что линия GMWL может быть смещена и иметь другой наклон для конкретной территории. Так, например, формула локальной линии метеорных вод (Local Meteoric Water Line – LMWL) для северного склона Крымских гор составила  $\delta D = 7.2 \cdot \delta^{18} O + 3.2$  [3], а для Восточного Средиземноморья –  $\delta D = 8 \cdot \delta^{18} O + 22$  [4]. При построении LMWL для территории г. Казани использовались данные по рекам и озерам, питание которых в основном происходит за счет атмосферных осадков. По полученным автором результатам изотопных исследований (таблица) формула LMWL для Казани имеет следующий вид:  $\delta D = 5 \cdot \delta^{18} O - 32$ .

В. Дансгаард установил [5], что избыток дейтерия (D) может использоваться для определения неравновесности условий в гидросфере и, в частности, эффекта испарения  $d_{\rm exc} = \delta D - 8 \cdot \delta^{18} O$ . Так, для GMWL  $d_{\rm exc}$  составляет 10. Значение  $d_{\rm exc}$  является показателем влияния испарения на физико-химические характеристики воды: если вода испаряется, то значение  $d_{\rm exc}$  обычно уменьшается; кроме того, показатель  $d_{\rm exc}$  отражает дисбаланс степени интенсивности испарения и процесса конденсации. Для гидросферы Казани выявлено отклонение стабильных изотопов кислорода и водорода от линии GMWL вправо по часовой стрелке (рисунок), что свидетельствует о незначительном испарительном процессе. Пробы

воды в озерах содержат более тяжелые изотопы, так как поверхностные воды подвержены более интенсивному испарению. В общем,  $d_{\rm exc}$  для гидросферы Казани имеет тенденцию к увеличению с глубиной от -14,6 ‰ до 10,8 ‰ (таблица), что может свидетельствовать об интенсивном испарении поверхностных вод.

Изотопный состав гидросферы на территории г. Казани, в ‰

	з гидросферы на герритори	in it itasaini, b 700		
Тип вод гидросферы	Объект (номер объекта на рис.)	δD (VSMOW)	δ <sup>18</sup> O (VSMOW)	$ m d_{exc}$
	Озеро Лебяжье (1)	-61.95	-5.92	-14.6
Поверхностные	Озеро Кабан (2)	-86.18	-11.00	1.8
озерные воды	Озеро Ковалевское (3)	-87.0	-10.5	-3.0
	Озеро Голубое (4)	-99.97	-13.58	8.7
Поровущостица	Река Волга (5)	-78.43	-9.96	1.2
Поверхностные речные воды	Река Солонка (6)	-94.26	-12.56	6.2
	Река Казанка (7)	-96.08	-13.10	8.7
Подземные	Водозабор Мирный, скв. 2a (8)	-97.0	-13.3	9.4
воды неогенового	Водозабор Мирный, скв. 4a (9)	-103.0	-13.5	5.0
комплекса	Водозабор Мирный, скв. 7 (10)	-108.0	-14.4	7.2
Почестини	Родник «Аки» (11)	-93.67	-12.85	9.1
Подземные воды	Водозабор Мирный, скв. 7 (12)	-108.0	-14.5	8.0
пермского комплекса	Водозабор Мирный, скв. 105 (13)	-110.0	-15.1	10.8

Таким образом, впервые проведенные изотопные исследования подтвердили метеорное происхождение вод в пределах г. Казани и позволили показать перспективы их использования для решения гидрологических и гидрогеологических задач.

- 1. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия города Казани / Научн. ред. А. И. Шевелев. Казань: Казан. ун-т, 2012. 236 с.
- 2. Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters // Science. 1961. Vol. 133. Is. 3465. P. 1702-1703.
- 3. Дублянский Ю.В., Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Токарев С.В., Шпётль К. Изотопный состав атмосферных осадков и карстовых источников северо-западного склона Крымских гор // Спелеология и карстология. 2012. № 9. С. 14—21.
- 4. Gat J.R. The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation. In: P. Fritz and J.-Ch. Fontes (Eds), Handbook of environmental isotope geochemistry, 1980. vol. 1, The Terrestrial Environment. A. Elsevier, Amsterdam, P. 21–48.
- 5. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. 1964. Vol. XVI. No 4. P. 436-468.

### ГЕОХИМИЯ И БАЛЬНЕОЛОГИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД ЖЕМЧУГСКИХ СКВАЖИН (ТУНКИНСКАЯ ВПАДИНА, РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-161-165

<sup>1</sup>Институт природных ресурсов, экологии и криологии CO PAH, Чита, l.v.zamana@mail.ru <sup>2</sup>Тункинский национальный парк, пос. Кырен, Республика Бурятия, lexam29@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты изучения химического, микрокомпонентного и изотопного состава термальных метановых и углекислых вод, вскрытых двумя скважинами глубиной 1026 и 1093 м в отложениях плиоцена и неогена осадочного чехла и кристаллических породах докембрия фундамента Тункинской впадины. Предложено выделить два бальнеологических типа вод — углекислые высококремнистые Cl-HCO<sub>3</sub> Mg-Na жемчугского и метановые HCO<sub>3</sub> Na тункинского типа. Сделан вывод о гетерогенной природе газовой фазы терм.

Ключевые слова: термальные воды, химический состав, бальнеологические типы.

**Abstract**. The article presents the study results of the chemical, microcomponent and isotopic composition of thermal methane and carbonic waters, recovered by two wells with a depth 1026 and 1093 m in the Pliocene and Neogene sediments of the sedimentary cover and crystalline rocks of the Precambrian basement of the Tunkinskaya depression. It is proposed to distinguish two balneological types in the existing classification of mineral waters additionally – carbonic high-siliceous Cl-HCO<sub>3</sub> Mg-Na Zhemchugsky and methane HCO<sub>3</sub> Na Tunkinsky types. A conclusion is made about the heterogeneous origin of the thermal waters gas phase.

Key words: thermal waters, chemical composition, balneological types.

Термальные воды в Тункинской впадине впервые выявлены в 1954 г. в 1.5 км от пос. Жемчуг на правом берегу р. Иркут при бурении трестом «Востсибнефтегеология» структурно-поисковой скважины № Р-1 на нефть. Осадочный чехол геологического разреза скважины представлен отложениями кайнозоя, впадина относится к байкальскому типу [14], объединяющему кайнозойские осадочные бассейны Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Термальная вода вскрыта скважиной в интервалах 728–732 и 754–864 м в разнозернистых песках плиоцена и в интервале 834–864 м в кварцевых песках миоцена при общей мощности пройденного осадочного чехла 1000 м. В кристаллический фундамент скважина углубилась на 26 м. Оба водоносных горизонта дали при самоизливе воду с температурой 38 и 41 °C гидрокарбонатного натриевого состава и минерализацией 0.76 и 0.80 г/дм³, по газовому составу преимущественно метановую с содержанием азота 15.9 об. %. По данным на 1967 г. минерализация воды была 1238 мг/дм³ при том же химическом составе и температуре 38.5 °C на самоизливе при дебите 7.5–8.0 л/с. Позже проявление терм названо Жемчугским [7, с. 131, табл. 21]. По химическому и газовому составу этой воды выделен *тункинский* тип гидрокарбонатных натриевых метановых терм БРЗ [7, 8].

В 1987 г. с целью поиска в подземных водах глубоких горизонтов сверхтяжелых элементов вблизи скважины P-1 была пройдена вторая скважина (№ 1-Г) глубиной 1093 м, которая в кристаллическом фундаменте, встреченном на глубине 1056 м, в интервале 1070—1093 м вскрыла углекислые воды с температурой 54.4 °C на устье при самоизливе [11]. Здесь породы фундамента указаны как докембрийские амфиболитовые гнейсы, кристаллические сланцы и амфиболиты, тогда как по скважине P-1 они в [7, 13] описаны как граниты. Если исключить возможность ошибки в приведенных ссылках и при описании разреза при бурении скважины P-1, разный петрографический состав можно объяснить существованием тектонического контакта по сбросу между породами фундамента. На это указывает разница в мощности осадочного чехла в 56 м при расстоянии между скважинами менее 200 м. При этом кристаллические породы с глубины 1070 м оказались сильнотрещиноватыми, к забою скважины трещиноватость их увеличивалась [11].

Углекислые воды скважины 1-Г представляли собой новый для Тункинской впадины тип гидротерм. Они имели минерализацию до 5.0 г/дм<sup>3</sup> и хлоридно-гидрокарбонатный магниево-натриевый состав, в отличие от сульфатно-гидрокарбонатных магниево-кальциевых углекислых терм, распространенных в 25 км к северу на борту впадины

Аршанского месторождения. Отличались они и высокой концентрацией кремнекислоты, достигавшей 330 мг/дм<sup>3</sup> (форма кремнекислоты в [11] не указана).

Летом 2017 г. нами проведено гидрогеохимическое опробование обеих скважин с отбором проб воды на изучение химического, микрокомпонентного и изотопного состава, результаты которого приведены в данном сообщении. Химический анализ водных проб (табл. 1, пробы с индексами ЖМ и ТД) выполнен в лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК CO PAHПО общепринятым нормативным Микроэлементы определялись масс-спектрометрическим методом с ионизацией в индуктивносвязанной плазме (ICP MS) в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск) в пробах, профильтрованных под давлением через мембранные фильтры с диаметром пор 0.45 мм. Изотопные анализы воды осуществлены в лаборатории изотопных исследований Геологического института ДВО РАН (г. Владивосток). Изотопные отношения водорода и кислорода рассчитаны относительно океанического стандарта SMOW.

Таблица 1. Химический состав метановых и углекислых терм Жемчугского проявления (компоненты состава в мг/ дм<sup>3</sup>)

(Rominonioni)	DI COCIUDU	В 11117 Д	··· <i>)</i>								
Номер	Дата	pН	Еһ, мВ	ПО,	$CO_2$	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	$SO_4^{2-}$	Cl <sup>-</sup>	$F^-$	$NO_3^-$	$\mathrm{NO}_2^-$
пробы	отбора			$M\Gamma O/дM^3$							
	Метановые термы, скважина Р-1										
б/н [7]	09.09.67	7.2	_	_	-	756.4	11.3	91.2	0.20	_	-
ЖМ-17-2	02.07.17	7.97	153	12.7	*12.0	802	4.7	74.1	0.06	9.39	_
ТД-17-2	26.08.17	8.23	202	12.3	2.64	860	5.2	70.4	0.04	11.7	2.17
			Угле	екислые те	рмы, ск	важина 1	-Γ				
б/н [9]	11.03.13	7.15	_	_	_	2744	25.5	955.5	0.28	_	_
ЖМ-17-1	02.07.17	7.19	98	1.9	740	2409	33.6	992	0.5	9.83	_
ТД-17-1	26.08.17	7.04	217	1.6	962	2441	36.7	975	0.25	8.96	1.55

Продолжение таблицы 1, правая сторона  $Ca^{2+}$  $Mg^{2+}$  $K^+$ Номер  $Na^{+}$  $NH_4^+$ Сумма Si Формула химического Робш. пробы ионов состава Метановые термы HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>82 Cl<sup>-</sup>17 б/н [7] 38.8 2.4 298.7 1.86 1238 13.1  $Na^{+}85 Ca^{2+}12$ HCO<sub>3</sub>-85 Cl-14 3.25 14.5 0.11 ЖМ-17-2 34.1 3.0 332.1 1263  $Na^{+}88 Ca^{2+}10$ HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>86 Cl<sup>-</sup>12 ТД-17-2 28.7 3.08 335.8 3.10 0.82 1321 14.6 0.82  $Na^{+}89 Ca^{2+}9$ Углекислые термы HCO<sub>3</sub>-60 Cl-40 б/н [9] 165.3 204.9 910.7 36.1 4776 102.1  $Na^{+}60 Mg^{2+}26 Ca^{2+}13$ *HCO*<sub>3</sub><sup>-</sup>58 *Cl*<sup>-</sup>41 218.2 | 170.0 | 999 35.5 ЖМ-17-1 4867 87.0 0.08  $Na^{+}63Mg^{2+}20 Ca^{2+}16$  $HCO_3^-59\ Cl^-40$ 37.8 0.22 ТД-17-1 195.1 | 176.2 | 1061 4934 89.1 0.22  $Na^{+}64 Mg^{2+}20.5Ca^{2+}14$ 

Примечание. ПО — перманганатная окисляемость; 6/H — без номера; прочерк — нет данных; \* — расчетная равновесная концентрация.

Полученные результаты показывают, что по химическому составу гидротермы обоих типов достаточно стабильны во времени, что отмечалось и в [12], хотя содержание  $HCO_3^-$  и  $Mg^{2+}$  в углекислых водах несколько уменьшилось, а в метановых термах концентрации гидрокарбоната и натрия, напротив, немного выросли. Эти изменения могут быть вызваны произошедшим со временем перераспределением парциального давления  $CO_2$  между водоносными комплексами пород фундамента и чехла вследствие проходки и самоизлива

скважин, что привело к изменению интенсивности углекислотного выщелачивания вмещающих пород и термодинамических равновесий в системах.

Из новых данных обратим внимание на повышенную окисляемость метановых терм, указывающую на присутствие в них органических веществ в пересчете на органический углерод в количестве 8–9 мг/л, что соответствует норме для лечебно-столовых минеральных вод по [1]. Очевидна необходимость определения окисляемости бихроматным методом, что позволит получить более надежные данные по содержанию Сорг. Еще один факт – содержание нитратов явно выше фоновых значений в обоих типах вод, что в силу глубокого залегания водоносных комплексов не может быть следствием антропогенного загрязнения, а является результатом протекающих in situ биогеохимических процессов.

Таблица 2. Микроэлементы в термальных водах Жемчугского проявления по данным анализа методом ICP MS (мкг/дм<sup>3</sup>)

	Предел	Про	обы	D=	Предел	Пробы		
Элемент	обнаруж.	ЖМ-17-1	ЖМ-17-2	Элемент	обнаруж.	ЖМ-17-1	ЖМ-17-2	
Li	0.26	2710	4.15	Ag	0.0002	0.0039	0.0046	
Be	0.0045	0.0075	0.0078	Cd	0.0030	0.0086	0.11	
В	0.25	5836	53	Sn	0.026	0.019	0.0094	
Al	0.97	2.65	2.65	Sb	0.0014	0.034	0.032	
Si	3.70	82774	14246	Cs	0.0009	7.8	0.10	
P	1.07	3.39	7.8	Ba	0.012	71	54	
Sc	0.0007	0.012	0.0055	La	0.00045	0.006553	0.011795	
Ti	0.11	0.30	0.36	Ce	0.00053	0.005548	0.007263	
V	0.0035	0.054	0.33	Pr	0.00005	0.000774	0.000848	
Cr	0.026	0.32	0.090	Nd	0.00061	0.008452	0.005552	
Mn	0.033	4.2	1.90	Sm	0.00016	0.000952	0.000990	
Fe	1.75	36	11.6	Eu	0.00049	0.010639	0.005593	
Co	0.029	0.018	0.095	Gd	0.00019	0.000364	0.001001	
Ni	0.11	0.36	0.58	Tb	0.00002	0.000097	0.000078	
Cu	0.14	0.24	0.81	Dy	0.00005	0.000511	0.000577	
Zn	0.69	0.069	0.84	Но	0.00006	0.000120	0.000129	
Ga	0.0009	0.040	0.043	Er	0.00010	0.000418	0.000378	
Ge	0.0067	16	0.30	Tm	0.00003	0.000073	0.000082	
As	0.078	0.51	0.035	Yb	0.00008	0.000794	0.000521	
Se	0.0030	0.23	0.024	Lu	0.00002	0.000201	0.000096	
Br	0.78	2502	176	Hf	0.0002	0.0004	0.0014	
Rb	0.0077	114	2.94	W	0.18	0.28	0.31	
Sr	0.047	2326	302	T1	0.0001	0.0033	0.0010	
Y	0.0008	0.023	0.0070	Pb	0.0063	0.25	0.018	
Zr	0.0030	0.034	0.21	Bi	0.0009	0.0011	0.0009	
Nb	0.0003	0.0053	0.0029	Th	0.0005	0.0010	0.0007	
Mo	0.092	0.66	1.64	U	0.0005	0.0014	0.0005	

По содержанию микроэлементов (табл. 2), широкий спектр которых изучен впервые, наиболее заметно различие гидротерм по Li, B, Ge, Br, Rb, Sr, Cs. Перечисленные элементы, кроме германия, являются типичными для углекислых вод, тогда как содержания Mn, Fe, Ва для них необычно низкие. Концентрации большей части лантаноидов в метановых термах несколько выше, чем в углекислых. Геохимические особенности распределения микроэлементов в рассматриваемых термальных водах – предмет отдельного рассмотрения.

При бальнеологической типизации минеральных вод одним из важных компонентов является кремний. При содержании метакремниевой кислоты  $H_2SiO_3$  не менее  $50 \text{ мг/дм}^3$  (18 мг/дм $^3$  Si) воды относятся к кремнистым [1]. В углекислых водах скважины 1-Г концентрации Si превышают требуемое значение больше, чем в четыре раза (см. табл. 1). Для сравнения, концентрации его в углекислых водах Большого Кавказа не более  $64.8 \text{ мг/ дм}^3$  (в

пересчете с  $H_4SiO_4$ ) при максимуме в термальных водах  $30.6 \text{ мг/дм}^3$  [6], Сихотэ-Алиня –  $36.9 \text{ мг/дм}^3$  [15], Приамурья –  $37.7 \text{ мг/дм}^3$  [5], в Терсинской воде Кузбасса –  $55.0 \text{ мг/дм}^3$  [4]. В опробованных в последние годы около 40 проявлениях холодных углекислых вод Восточного Забайкалья максимальное содержание Si было  $36.5 \text{ мг/дм}^3$ , а по литературным данным достигало  $58 \text{ мг/дм}^3$  ( $200 \text{ мг/дм}^3$  по  $H_4SiO_4$ ) [2].

В указанном ГОСТе в числе кремнистых выделен кукинский тип минеральных углекислых вод гидрокарбонатного магниево-кальциевого состава с минерализацией до 5.0 мг/дм<sup>3</sup>. По химическому составу углекислые термы Жемчуга этому типу вод, как и другим представленным в [1] типам, не соответствуют. По принятому в производственной гидрогеологии стандарту [10], согласно которому в наименование химического типа воды входят ионы с содержанием от 20 экв. %, состав их хлоридно-гидрокарбонатный магниевонатриевый. В группе хлоридно-гидрокарбонатных вод ГОСТа тип с таким катионным составом отсутствует, существуют различия и по концентрациям компонентов состава или общей минерализации, содержанию или наличию биологически активных компонентов (борной кислоты и др.). В частности, содержание бора (табл. 2) в пересчете на борную кислоту равно 33.4 мг/дм<sup>3</sup>, что лишь немногим ниже бальнеологической нормы (35 мг/дм<sup>3</sup> по [1]).

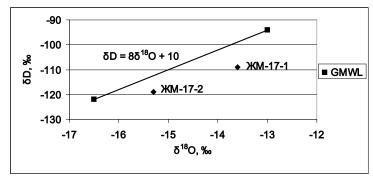
Отсюда очевидно, что рассмотренные термальные углекислые воды представляют собой самостоятельный бальнеологический тип высококремнистых лечебно-столовых вод хлоридно-гидрокарбонатного магниево-натриевого состава с минерализацией до 5.0 г /дм<sup>3</sup> и близким к норме содержанием бора, который мы предлагаем называть жемчугским. Метановые термы также заслуживают выделения в особый тип лечебно-столовых вод, за которым следует закрепить название тункинский по устоявшемуся в литературе названию HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> Na<sup>+</sup> горячих вод впадин байкальского типа [7, 8 и др.], особенно при подтверждении повышенной концентрации в них Сорг. В [1] пока представлен только один тип минеральной воды с высоким содержанием  $C_{\text{орг.}}$  – ундоровский, вода которого сульфатногидрокарбонатная магниево-кальциевая. Внесение в ГОСТ после соответствующих исследований жемчугских гидротерм в качестве самостоятельных типов минеральных вод будет способствовать созданию специализированного курорта и целенаправленному лечебному применению их по показаниям с надлежащим медицинским обслуживанием. Сейчас на термах существует два бассейна с той и другой водой и душевые на метановой воде, которые весьма популярны среди населения Иркутской области и Республики Бурятия и за их пределами и используются для купаний, душа и самостоятельного лечения.

Различаются между собой жемчугские термы и по изотопному составу воды. В углекислой воде изотопное отношение по кислороду  $\delta^{18}O_{SMOW}$  равно -13.6 %, по водороду  $\delta D_{SMOW}$  -109.0 %, в метановой — соответственно -15.3 и -119.0 %. Точки состава в обоих случаях находятся ниже Глобальной линии метеорных вод Крейга (GMWL) (рисунок), положительный сдвиг по кислороду равен 1.3 и 0.8 %.

Утяжеление воды по кислороду для открытых водоемов обычно объясняется ее испарением. В данном случае испарения быть не может, причина, очевидно, в изотопном фракционировании при взаимодействии воды с вмещающими породами. Чем выше степень этого взаимодействия, свидетельством чему является минерализация воды, тем более тяжелой становится вода и по кислороду, и по водороду. Симбатный характер изменения изотопных отношений водорода и кислорода воды при ее взаимодействии с вмещающими породами показан по азотным термам [3].

Изотопный состав углерода свободного  $CO_2$  углекислой воды  $\delta^{13}C_{PDV}$ , по данным [9], равен -0.9 %, что указывает на преимущественно термометаморфическое происхождение углекислого газа. В [11] на основании изотопных отношений гелия  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ , изменявшихся в пределах  $(0.7-0.8)\cdot 10^{-5}$  и  $(0.79-0.89)\cdot 10^{-5}$  для метановых и углекислых терм соответственно (в работе [12] после поправки на контаминацию воздухом гелиевое отношение в углекислых водах выросло до  $1.12\cdot 10^{-5}$ ), авторы сделали вывод о преимущественно мантийном поступлении газов. С учетом данных по изотопному составу углерода и отсутствию метана в

термах скважины 1-Г очевиден гетерогенный генезис газовой фазы как углекислых, так и метановых жемчугских гидротерм.



Положение точек изотопного состава воды жемчугских терм относительно Глобальной линии метеорных вод (GMWL).

Таким образом, гидрохимические характеристики метановых и углекислых термальных вод Жемчугского проявления при резком различии по химическому составу, минерализации и ряду микрокомпонентов остаются стабильными в течение длительного периода фонтанирования вскрывших их скважин. По классификационным показателям рассмотренные гидротермы отличаются от включенных в ГОСТ по минеральным питьевым водам бальнеологических типов. Стандартизация предлагаемых двух типов минеральных вод будет способствовать расширению использования их в курортном деле.

- 1. ГОСТ Р 54316–2011. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2011.
- 2. Замана Л.В. Углекислые воды Даурской гидроминеральной области (Восточное Забайкалье) // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2018. Т. 95, № 4. С. 69–74. DOI: 10.17116/kurort20189504169.
- 3. Замана Л.В. Изотопный состав водорода и кислорода азотных гидротерм Байкальской рифтовой зоны с позиций взаимодействия в системе вода–порода // Доклады Академии наук. 2012. Т. 442, № 1. С. 102–106.
- 4. Копылова Ю.Г., Лепокурова О.Е., Токаренко О.Г., Шварцев С.Л. Химический состав и генезис углекислых минеральных вод месторождения Терсинское (Кузбасс) // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436, № 6. С. 804–808.
- 5. Кулаков В.В., Сидоренко С.В. Минеральные воды и лечебные грязи Приамурья. Хабаровск: Изд-во ДВМГУ, 2017. 474 с.
  - 6. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. М.: ГЕОС. 2012. 348 с.
- 7. Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1974. 168 с.
- 8. Минеральные воды южной части Восточной Сибири. Т. 1. Гидрогеология минеральных вод и их народнохозяйственное значение / Под ред. В.Г.Ткачук, Н.И. Толстихина М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1961. 346 с.
- 9. Оргильянов А.И., Крюкова И.Г., Бадминов П.С. Лечебные углекислые минеральные воды Монголо-Байкальского региона // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2015. № 2. С. 103–108.
- 10. ОСТ 41-05-263-86. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. М.: ВСЕГИНГЕО, 1986
- 11. Павлов С.Х., Пиннекер Е.В., Писарский Б.И. Углекислые воды Тункинской впадины (Восточный Саян) // Геология и геофизика. 1995. Т. 36, № 9. С. 28–35.
- 12. Павлов С.Х., Чудненко К.В., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Геологические факторы и физико-химические процессы формирования подземных вод Тункинской впадины // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 1. С. 221–248. DOI: 10.5800/GT-2018-9-1-0346.
- 13. Ткачук В.Г., Яснитская Н.В., Анкудинова Г.А. Минеральные воды Бурят-Монгольской АССР. Иркутск, 1957. 153 с.
- 14. Флоренсов Н.А. Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 258 с.
- 15. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 216 с.

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРЕДЕЛАХ КРАЕВОЙ ЧАСТИ САЛБАТСКОЙ МУЛЬДЫ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУППОВЫМИ ВОДОЗАБОРАМИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-166-170

Зарубов М.С.<sup>1</sup>, Фадина Т.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>OOO «Экосупервайзер», Красноярск, ecosv@mail.ru <sup>2</sup>OOO «ТЦ «Эвенкиягеомониторинг», Красноярск, evgm@evgm.ru

Аннотация. В настоящей статье приведены результаты анализа данных многолетних режимных наблюдений за химическим составом пресных, питьевых, подземных вод краевой части Салбатской мульды. В ходе работы были использованы материалы опробования подземных вод на участках трех крупных водозаборов, расположенных на Ужурском МПВ и Учумском МПВ. Результаты работ позволяют дать рекомендации по оптимизации контролируемых показателей качества воды при составлении программ производственного контроля и сократить расходы на производство химических анализов подземных вод для исследуемых водозаборов.

**Ключевые слова:** подземные воды, Салбатская мульда, Ужурское МПВ, Учумское МПВ, химический состав.

**Abstract.** This article presents the results of the analysis of the data of long-term, regime monitoring of the chemical composition of fresh, drinking, underground waters of the regional part of the Salbat syncline. In the course of the work, materials were used from groundwater sampling at the sites of three large water intakes located at the Uzhur and Uchum GWD. The results of the work make it possible to give recommendations on optimizing the controlled indicators of water quality when drawing up production control programs, and to reduce the cost of producing chemical analyzes of groundwater for the studied water intakes.

Key words: groundwater, Salbat trough, Uzhurskoe MPV, Uchumskoe MPV, chemical composition.

### Физико-географическая характеристика района

В административном отношении исследуемая территория находится на юге Красноярского края, в Ужурском муниципальном районе. Ближайшим крупным населенным пунктом является город Ужур с населением 15 333 чел. В районе достаточно хорошо развита сеть шоссейных и грунтовых автодорог, проходит железная дорога Ачинск — Абакан. Экономика района представлена преимущественно сельским хозяйством.

В геологическом строении района работ принимают участие отложения девонской, каменноугольной и четвертичной систем. Наибольшим распространением пользуются девонские и каменноугольные отложения, выполняющие Салбатскую мульду. Отложения четвертичной системы распространены в долинах рек и в виде маломощного чехла, покрывающего водоразделы.

В тектоническом отношении Салбатская мульда находится в северной части Северо-Минусинской впадины и представляет собой крупную чашеобразную структуру прямоугольной формы с несколько сглаженными углами. Сложена сравнительно слабометаморфизованными вулканогенными, континентальными, континентально-лагунными, реже морскими отложениями девонского и каменноугольного возраста.

На площади района выделяются водоносный голоценовый аллювиальный горизонт, водоносный нижнекаменноугольный комплекс  $(C_1)$ , водоносный верхнедевонский комплекс  $(D_3)$ , водоносный среднедевонский комплекс и водоносная нижнесреднедевонская зона трещиноватости.

Для водоснабжения используются в основном подземные воды нижнекаменноугольных и верхнедевонских отложений. В краевых частях Салбатской мульды расположены месторождения подземных вод, эксплуатируемые групповыми водозаборами для водоснабжения г. Ужур, ЗАТО «Солнечный», поселка и курорта «Озеро Учум», п. Златоруновский (рис. 1).

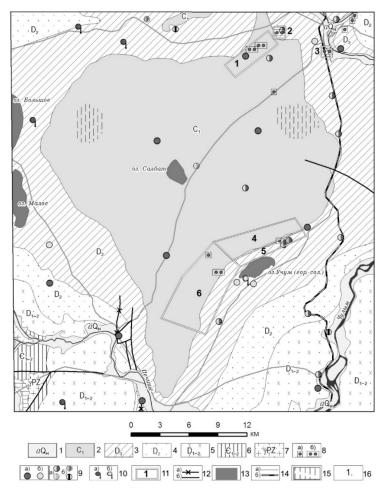


Рис. 1. Схематическая карта размещения водозаборов в пределах краевой части Салбатской мульды. Распространение водоносных горизонтов, комплексов и зон: 1 – водоносный четвертичный аллювиальный горизонт; 2 – водоносный нижнекаменноугольный комплекс; 3 – водоносный верхнедевонский комплекс; 4 – водоносный среднедевонский комплекс; 5 – водоносная нижнесреднедевонская зона; 6 – водоносная нижнесреднекембрийская зона; 7 – палеозойская зона открытой трещиноватости; 8 – водозаборы: a) одиночные, б) групповые; 9- картировочные скважины по химическому составу: а) гидрокарбонатные, б) сульфатные, а) сульфатно-гидрокарбонатные, сульфатно-хлоридные, хлоридно-гидрокарбонатные, б) трехкомпонентные; 10 – родники (по химическому составу): а) гидрокарбонатные, б) сульфатные; 11 – контур МПВ и его номер; 12 – разломы: а) водоносные, б) значение не выявлено; 13 — озеро; 14 — дороги: a) автомобильные, б) железная; 15 — верховое болото; 16 номер и наименование МПВ, УППВ и УТПВ с утвержденными запасами, тыс. м<sup>3</sup>/сут: 1 – Ужурское МПВ, 11.9; 2 – Кулунский УТПВ, 0.55; 3 – Ужурско-Ключевской УППВ, 0.9; Учумское МПВ: 4 – Златоруновский УППВ, 10.3; 5 – Восточный УППВ, 0.7; 6 – Озероучумский УППВ, 0.52.

Ужурское МПВ расположено в северо-восточном крыле Салбатской мульды и приурочено к отложениям быстрянской свиты нижнего карбона (C<sub>1</sub>bs) и тубинской свиты верхнего девона (D<sub>3</sub>tb). В пределах месторождения на 2021 г. выделено три участка с суммарными утвержденными запасами категории  $A+B+C_1$  в количестве 11.9 тыс.  $M^3/C$ ут. Групповым водозабором на УППВ Солнечный эксплуатируется водоносный нижнекаменноугольный комплекс, групповым водозабором на УППВ Ужурский нижнекаменноугольный+верхнедевонский водоносный комплекс. Северо-восточнее Ужурского МПВ находится Кулунский участок технических подземных утвержденными запасами водоносного верхнедевонского комплекса в 0.550 тыс. м<sup>3</sup>/сут по категории В. В настоящее время не эксплуатируется. Кроме того, в пределах г. Ужура, В с. Кулун, д. Усть-Сосновка эксплуатация верхнедевонского

водоносного комплекса осуществляется одиночными водозаборными скважинами со среднесуточным водоотбором по ним менее 100 м<sup>3</sup>/сут и групповым водозабором на УППВ Ужурско-Ключевской с утвержденными запасами категории В в объеме 0.900 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

На юго-восточном крыле Салбатской мульды подземные воды Учумского МПВ приурочены к отложениям верхнедевонского водоносного комплекса тубинской свиты и нижнекаменноугольного комплекса. Для водоснабжения поселков Озеро Учум и Златоруновск на участке Восточный утверждены запасы в количестве 0.7 тыс.  $m^3$ /сут по категории  $B+C_1$ . Для водоснабжения курорта «Озеро Учум» на участке Озероучумский утверждены запасы 0.55 тыс.  $m^3$ /сут по категории B. К северу от Озероучумского участка находится неэксплуатируемый Златоруновский УППВ Учумского МПВ с утвержденными запасами  $C_1$  в количестве 10.5 тыс.  $m^3$ /сут.

Анализ изменения химического состава подземных вод, эксплуатируемых действующими групповыми водозаборами в краевой части Салбатской мульды, выполнен по данным, полученным в ходе работ по подсчету запасов.

На УППВ Ужурский использовались данные за периоды с 2009-2014 гг., 2019-2020 гг.; по водозабору на УППВ Солнечный за 2007-2010, 2019-2020 гг.; по УППВ Левобережный за 2019-2020 гг. В общей сложности было проанализировано 111 протоколов химических анализов ежеквартального химического опробования. В пределах Ужурского УППВ вскрыты отложения быстрянской свиты нижнего карбона ( $C_1$ bs) и тубинской свиты верхнего девона ( $D_3$ tb). На УППВ Солнечный и Левобережный вскрыты отложения быстрянской свиты нижнего карбона ( $C_1$ bs). Для подземных вод Ужурского МПВ характерно преобладание гидрокарбонатных натриевых вод с минерализацией от 0.4 до 0.6 г/дм $^3$ . Общая жесткость от 2.1-5.2 ммоль/дм $^3$ , рН -6.0-8.4.

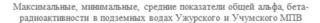
По Учумскому МПВ проанализировано 44 протокола химических анализов подземных вод. К ним относятся протоколы химических анализов подземных вод по Златоруновскому и Учумскому участкам за период с 2013 по 2015 г. В пределах Учумского МПВ на участке Восточном эксплуатируются подземные воды верхнедевонского водоносного комплекса тубинской свиты, на участке Озероучумский — подземные воды верхнедевонского и нижнекаменноугольного водоносного комплекса. Подземные воды по химическому составу преимущественно гидрокарбонатные натриевые, кальциевые с минерализацией 0.53–0.79 г/дм<sup>3</sup>. По степени жесткости воды мягкие и умеренно-жесткие. Общая жесткость подземных вод от 0.8–5.3 ммоль/дм<sup>3</sup>, рН — 7.3–8.4

составе различия химическом Существенного В подземных вод наблюдается. Подземные воды, вскрытые скважинами, количественному и качественному составу характеризуются высокой однородностью. Содержание микрокомпонентов (Zn, Cu, Pb, F<sup>+</sup>, Sr, Se, As, Cd, B, Li, I, Al, Cr, Cd, Ni, Mb) намного ниже ПДК для питьевых подземных вод. Такие элементы, как Со, Рь, Нд, Ве (на Ужурском МПВ) и K, Cd, Co, Pb, Hg, Be (на Учумском МПВ), стабильно отмечаются вне пределов обнаружения.

Одной из особенностей химического состава подземных вод на месторождениях является повышенное значение показателя общей альфа-радиоактивности подземных вод. Для оценки содержания радиоактивных частиц в подземных водах было проанализировано 20 протоколов химических анализов по Ужурскому МПВ, охватывающих временной промежуток с 2009 по 2020 г., и 9 протоколов химических анализов для Учумского МПВ, охватывающих временной промежуток с 2013 по 2015 г.

Среднее содержание альфа-частиц в воде составляет от 0.61 Бк/кг (Ужурское МПВ) до 1.13 Бк/кг (Учумское МПВ) при нормативе 0.2 Бк/кг (таблица).

Содержание радона  $Rn_{222}$  на Ужурском МПВ от 25 до 150 Бк/кг (в среднем 88.64 Бк/кг при ПДК 60.0 Бк/кг). На Учумском МПВ содержание радона  $Rn_{222}$  ниже, чем на Ужурском МППВ (около 23.1 Бк/кг, что не превышает норматива) (рис. 2).



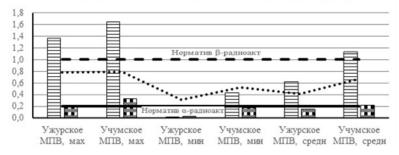






Рис. 2. Сравнительная характеристика минимальных, максимальных, средних значений радиологических показателей на месторождениях. 1 — показатель общей альфарадиоактивности; 2 — показатель общей бета-радиоактивности; 3 — минерализация, г/дм $^3$ ; 4—6 — содержание (Бк/кг): 4 — радона-222, 5 — урана-234, 6 — урана-238.

Среднее содержание изотопа  $U_{234}$  на Ужурском МПВ составляет  $0.42~\rm Kkr$ , на Учумском МПВ –  $0.95~\rm Kkr$ . Содержание остальных радиообразующих элементов находится значительно ниже их уровня вмешательства.

Повышенное содержание альфа-частиц и радона Rn222, фиксируемое в ходе многолетних режимных наблюдений, проводимых с 2009 г. по скважинам, пробуренным на отложения нижнекаменноугольного и верхнедевонского водоносных комплексов, на разных месторождениях краевой части Салбатской мульды указывает на то, что рост содержания радиоактивных элементов естественно для подземных вод данного региона и не является следствием загрязнения.

Повышенное содержание радона в подземных водах нижнекаменноугольных и верхнедевонских отложений на площади Ужурского МПВ связано с развитием в верхней зоне до глубины 75–90 м трещин выветривания и крутопадающих трещин тектонического происхождения. Чем ближе к тальвегу долины расположены водозаборные скважины, тем вероятнее увеличение содержания радона в воде, что подтверждается бурением скважин на левобережном участке на расстоянии 100 м от русла р. Кулун.

Содержание радиоактивных элементов в подземных водах

Наименование	Норма-	У	курское М	ПВ	Соотв.	Учумское МПВ			Соотв.
показателей, ед. изм.	тив по СанПиН	Мин.	Макс.	Сред.	норма- тиву	Мин.	Макс.	Сред.	норма- тиву
Общая α- радиоактивность, Бк/кг	0.20	0.02	1.37	0.62	не соотв.	0.43	1.65	1.13	не соотв.
Общая β- радиоактивность, Бк/кг	1.00	0.03	0.20	0.15	соотв.	0.17	0.33	0.22	соотв.
Радон-222, Бк/кг	60.0	25.10	150.0	88.51	не соотв.	9.61	40.73	23.10	соотв.
Полоний-210	0.11	0.02	-	0.02	соотв.	0.02	0.02	0.02	соотв.
Свинец-210	0.60	0.05	-	0.05	соотв.	0.05	0.05	0.05	соотв.
Радий-226	0.49	0.05	-	0.05	соотв.	0.03	0.03	0.03	соотв.
Радий-228	0.20	0.05	-	0.05	соотв.	0.05	0.05	0.05	соотв.
Уран 234	2.80	0.40	0.45	0.43	соотв.	0.76	1.26	0.95	соотв.
Уран 238	3.00	0.05	0.06	0.06	соотв.	0.14	0.34	0.24	соотв.
Торий-228	1.90	0.05	-	0.05	соотв.	-	-	-	соотв.
Торий-230	0.65	0.05	-	0.05	соотв.	-	-	-	соотв.
Торий-232	0.60	0.05	-	0.05	соотв.	-	-	-	соотв.

По данным гамма-каротажа интервалы с повышенной активностью пород от 150 до 330 мкР/час приурочены к преимущественно тонкозернистым песчаникам желтовато-серого цвета с прослоями черных углистых алевролитов. На Учумском МПВ содержание радона находится ниже нормативных значений, что связано, скорее всего, с отсутствием тектонической трещиноватости в пределах выделенных участков. Превышение показателя общей альфа-активности обусловлено, вероятно, присутствием изотопа  $U_{234}$  в количестве менее норматива, но более, чем содержание остальных радионуклидов. Источником превышения может являться присутствие в каменноугольных отложениях обугленных остатков растительности (детритов).

Нормы производственного контроля за качеством подземных вод на данных месторождениях предусматривают наблюдения за содержанием общих показателей, неорганических веществ, органических веществ и микробиологических показателей один раз в квартал, радиологических показателей — один раз в год. Полученные содержания радионуклидов в воде позволяют в настоящее время использовать воду без предварительной водоподготовки и ограничиться обязательным контролем за показателями общей альфа-и бета-радиоактивности и радона. При постоянном увеличении показателя общей альфарадиоактивности и радона необходимо выполнять расширенные радиологические анализы на определение основных радионуклидов.

Так как содержание таких микрокомпонентов, как Co, Pb, Hg, Be, стабильно находится вне пределов обнаружения прибором, по ним рекомендуется увеличить периодичность опробования до одного раза в три года. Содержанию радиологических показателей в подземных водах, напротив, рекомендуется уделить особое внимание и в случаях превышения показателя общей альфа-радиоактивности делать развернутую радиологию один раз в год.

- 1. Баранов В.И. Отчет по оценке эксплуатационных запасов подземных вод действующего водозабора МУП ЖКХ ЗАТО «Солнечный» (с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2010 г.). Селиваниха, 2011.
- 2. Кузнецова Е.А. Переоценка запасов подземных вод на участке «действующий водозабор» Учумского месторождения питьевых подземных вод в Ужурском районе Красноярского края» (с подсчетом запасов по состоянию на 30.04.2019 г.). Селиваниха, 2019
- 3. Фадина Т.А. Отчеты с подсчетом запасов подземных вод на площади Ужурского МПВ, Учумского МПВ за период 1986–1988, 2013–2014, 2009–2015, 2009–2016, 2019–2020 гг.

# КИСЛЫЕ ТЕРМАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ОСТРОВА УРУП (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА): ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ВЫНОС МАГМАТИЧЕСКИХ И ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-171-174

Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Волошина Е.В., Топчиева О.М. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, keg@kscnet.ru

Аннотация. На западном склоне действующего вулкана Берга и у подножия потухшего вулкана Три Сестры (в районе мыса Ключевого) находятся ареалы разгрузки кислых термальных вод. Источники вулкана Берга теплые (Т до 40 °C), кислые (рН 3.5–3.8) SO<sub>4</sub>-Cl Са типа с минерализаций до 2.5 г/л, а источники вулкана Три Сестры имеют температуру до 45 °C, рН<3 и относятся к SO<sub>4</sub>-Cl Са типу с минерализацией до 1.9 г/л. Общий измеренный вынос Cl и SO<sub>4</sub> источниками вулкана Берга составляет  $9\pm1.3$  т/сут и  $23.3\pm3.4$  т/сут, источниками мыса Ключевого  $-0.5\pm0.2$  т/сут и  $2.3\pm0.8$  т/сут, соответственно. Предварительно оцененная химическая эрозия постройки вулкана Берга с участием термальных вод составляет 700-800 т/км²/год.

Ключевые слова: термальные воды, остров, вулкан, химический состав.

**Abstract.** On the western slope of the active volcano Berga and at the foot of the extinct Tri Sestry volcano (in the area of Cape Klyuchevoy), there are areas of discharge of acidic thermal waters. The springs of Berg volcano are warm (T up to 40 °C), acid (pH 3.5-3.8) SO<sub>4</sub>-Cl-Ca-type with mineralization up to 2.5 g/L. The springs of Tri Sestry volcano have temperatures up to 45 °C, pH<3 and SO<sub>4</sub>-Cl-Ca-type with mineralization up to 1.9 g/L. The measured hydrothermal output from Berg volcano is 9 t/day for Cl and 24 t/day for SO<sub>4</sub>. The preliminary estimated chemical erosion of the Berg volcano edifice with the participation of thermal waters is 700-800 t/km<sup>2</sup>/year.

Key words: thermal waters, Island, volcano, chemical composition.

Остров Уруп (рис. 1), вытянутый на 115 км с юго-запада на северо-восток, расположен в южной части Курильской дуги.

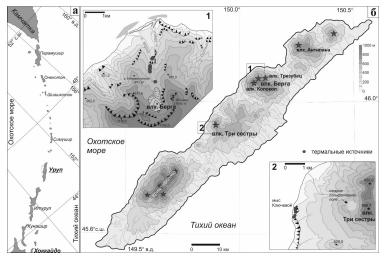


Рис. 1. Курильская островная дуга (a) и основные морфоструктуры о. Уруп (b). На врезках показаны схемы расположения точек опробования вулкана Берга (1) и вулкана Три Сестры (2).

Вулканические хребты, ориентированные вдоль острова, являются его основным водоразделом. Позднеплейстоцен-голоценовые вулканы Колокол, Берга, Трезубец, Борзова, Три Сестры, массив Ивао (хребет Криштофовича) сложены породами от базальтов до андезитов. Действующими и потенциально активными являются вулканы Берга, Трезубец и Колокол [1]. На склонах и у подножий голоценовых вулканов находятся выходы различных по химическому составу и температуре термальных вод.

В августе 2017 г. авторы данной публикации посетили две наиболее мощные группы гидротермальных проявлений острова: источники на западном склоне действующего вулкана

Берга и источники у подножия потухшего вулкана Три Сестры, в районе мыса Ключевого (см. рис. 1). На основе результатов полевых и аналитических исследований в работе дается их краткое геохимическое описание, включая данные по химическому (макро- и частично микрокомпонентному) и изотопному составу термальных вод. Обсуждаются проблемы формирования химического и изотопного состава источников, а также дается оценка гидротермального выноса магматических (С1 и S) и породообразующих компонентов кислыми термальными водами.

### Общая характеристика и химический состав вод

Вулкан Берга (рис. 1) находится на западном берегу острова и занимает центральную позицию в группе вулкана Колокол. Частично разрушенная сомма вулкана образует открытый на северо-запад амфитеатр полукальдеры диаметром ~2 км и высотой гребней до 1150 м. Дно кальдеры занимает экструзивный купол с эксплозивным кратером на вершине, в котором сосредоточены все активные фумаролы вулкана.

Постройка вулкана вмещает гидротермальную систему, поверхностные проявления которой представлены кислыми (pH 3.1-3.4) теплыми источниками SO<sub>4</sub>-Cl Ca типа, вытекающими на разном удалении от экструзивного купола. Выходы термальных вод на сопровождаются интенсивным осадкообразованием железосодержащих минералов, формирующих каскады охристого цвета. Расходы термальных ручьев колеблются от 2 до 10 л/с. Термальные воды вулкана Берга имеют температуру в диапазоне от 22 до 39 °C и минерализацию 2.3-2.5 г/л. Концентрации основных анионов  $SO_4^{2-}$  и  $Cl^$ достигают 1 и 0.5 г/л соответственно. Содержание фтора – до 3.7 мг/л. В катионном составе преобладает  $Ca^{2+}$  со средней концентрацией ~320 мг/л. Содержание  $Mg^{2+}$  составляет  $145 \text{ мг/л}, \text{ Na}^+ - 180 \text{ мг/л}.$  Отмечаются повышенные значения  $\text{Al}^{3+}$  (до 17 мг/л),  $\text{Fe}_{\text{обш}}$  (до 10 мг/л) и Мn (до 13 мг/л). Содержание SiO<sub>2</sub> варьируется от 100 до 150 мг/л. В осадках источников впервые для Курильских островов нами обнаружен оксигидроксисульфатный минерал швертманнит ( $Fe_8O_8(SO_4)(OH)_6 \times nH_2O$ ).

Дренирующие кальдеру р. Марья и р. Дарья ниже разгрузки приобретают схожий с источниками химический состав при меньшей минерализации (1.4–1.6~г/л) и температуре  $(14–15~^{\circ}\text{C})$ , более высоких значениях рН (до 3.9 в р. Дарья). Они впадают в Охотское море на расстоянии около 1 км друг от друга. При смешении морских и речных вод образуются мутные шлейфы шириной от 20 до 50 м.

Потухший вулкан Три Сестры, расположенный в центральной части острова на западном побережье, представляет собой короткий хребет, вытянутый в северо-восточном направлении (рис. 1) и значительно расчлененный эрозионными долинами. Период деятельности вулкана Три Сестры относится к позднему плейстоцену – раннему голоцену. Вулкан сложен лавами дациандезитов и андезитов, перемежающимися горизонтами рыхлых пемзовых брекчий и маломощными прослоями пемзовых туфов в нижней части разреза [2]. Выходы кислых (рН 2.1–2.8) SO<sub>4</sub>-Cl Са термальных вод температурой 27–45 °C находятся у западного подножия вулкана на берегу Охотского моря у мыса Ключевого. Это линейная разгрузка безнапорных вод протяженностью 380 м в береговом обрыве на контакте субгоризонтально залегающих пемзовых брекчий с дислоцированными туффитами [2]. Дебиты отдельных выходов достигают 1–2 л/с при общей видимой разгрузке 20–30 л/с. Минерализация вод находится в диапазоне от 1 до 2 г/л. Преобладающими анионами являются  $SO_4^{2-}$  и  $Cl^-$ . Концентрации фтор-ионов находятся в пределах 0.7-1.5 мг/л. Основным катионом выступает  $Ca^{2+}$  с диапазоном концентраций 131-242 мг/л. Значения  $Na^+$ изменяются от 78 до 133 мг/л,  $Mg^{2+}$  – от 28 до 48 мг/л. Для источников характерны высокие содержания алюминия (до 15 мг/л), железа (до 14 мг/л) и марганца (до 4 мг/л). Концентрация SiO<sub>2</sub> в водах достигает 165 мг/л. Выходы термальных вод на поверхность сопровождаются интенсивным отложением светло-желтого осадка, представленным кашеобразной самородной серой.

Термальные воды вулканов Берга и Три Сестры (мыс Ключевой) – типичные кислые сульфатно-хлоридные вулканические воды, широко распространенные в районах

островодужного вулканизма. Как правило, разгрузка этих вод осуществляется на склонах активных вулканов. Особенности формирования и геохимии вод этого типа подробно описаны в работе [3]. Их анионный состав формируется с участием магматических летучих, преимущественно HCl и SO<sub>2</sub>, а катионный состав — за счет процессов выщелачивания из вмещающих пород (рис. 2).

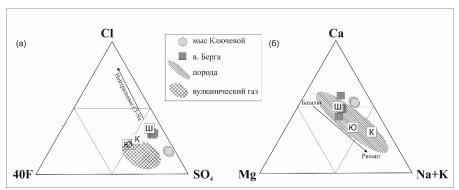


Рис. 2. Весовое соотношение анионов (a) и катионов  $(\delta)$  в термальных водах острова Уруп. Для сравнения на диаграмме для анионов (a) показаны составы высокотемпературных вулканических газов [4], на диаграмме для катионов  $(\delta)$  — области составов известковощелочных вулканических пород [5]. Буквами обозначены средние составы некоторых кислых SO<sub>4</sub>-Cl вод Курильских о-вов (Ш — ЦЭК вулкана Синарка, о. Шиашкотан; Ю — Верхне-Юрьевские источники, о. Парамушир; К — Кипящая речка, о. Итуруп. По [5–7]).

### Вынос магматических и породообразующих компонентов термальными водами

Используя гидрометрические данные основных водотоков, дренирующих термальные источники и их химический состав, можно оценить общую гидротермальную разгрузку магматических Cl и S, а также оценить химическую эрозию вулканических построек.

Общая характеристика и методика расчета выноса магматических летучих гидротермальными системами Курильских островов приведены в работе [8]. Поверхностный сток с кальдеры вулкана Берга осуществляется в Охотское море. Основными дренирующими водотоками, как упоминалось выше, являются реки Марья и Дарья (см. рис. 1). Концентрации хлор- и сульфат-ионов в фоновых водах составляют соответственно 5 и 17.2 мг/л. Измеренный расход р. Марья в устье составил 242 л/с при концентрации хлор-иона 287 мг/л и сульфат-иона 648 мг/л. Следовательно, с учетом фоновых содержаний, ежесекундно в Охотское море поступает 68 г хлора и 156 г сульфата, или 5.9 и 13.4 т/сут соответственно. Концентрации рассматриваемых компонентов в устье р. Дарья — 168 мг/л (СІ¬) и 522 мг/л (SO<sub>4</sub><sup>2</sup>¬) при расходе в 219 л/с, что в пересчете дает 3.1 т/сут и 9.9 т/сут соответственно.

Таким образом, общий гидротермальный вынос системой вулкана Берга составляет 9.0 т/сут Cl и 23.3 т/сут SO<sub>4</sub>. Величина ошибки не менее 15 % (погрешность при определении расходов поверхностных водотоков). Эти данные сопоставимы с результатами, полученными для вулкана Синарка (о. Шиашкотан) (34 т/сут SO<sub>4</sub> и 9.7 т/сут Cl) [5], но значительно ниже, чем вынос серы и хлора гидротермальной системой вулкана Эбеко (о. Парамушир) (~250 т/сут SO<sub>4</sub> и 82 т/сут Cl [6]).

Источники мыса Ключевого разгружаются на Охотоморском побережье острова в непосредственной близости к прибойной зоне. Не формируя общего водотока, отдельными короткими ручейками они стекают непосредственно в море. Общий дебит источников, оцененный по наиболее крупным струям, составляет  $30\pm10~\mathrm{n/c}$ . Среднеарифметические концентрации (по данным 7 проб) хлор-иона составляют  $195~\mathrm{mr/n}$ , сульфат-иона —  $898~\mathrm{mr/n}$ . Следовательно, с учетом фоновых содержаний, ежесекундно в Охотское море поступает не менее  $5.8\pm1.9$  г хлора и  $27\pm9$  г сульфата, или  $0.5\pm0.2$  т/сут и  $2.3\pm0.8$  т/сут соответственно.

Химическая эрозия вулканических пород в областях недавнего и современного вулканизма островных дуг является одним из наиболее интенсивных силикатных

выветриваний. Связанный с этим вынос растворенного вещества (катионы+SiO<sub>2</sub>) поверхностными водотоками оказывает влияние на стабильность вулканических построек, а также на химический состав омывающих их морей и океанов. Средняя сумма растворенных веществ (SiO<sub>2</sub>, Na, K, Ca, Mg, Fe<sub>общ</sub> и  $Al^{3+}$ ), определяющих катионный состав вод рек Дарья и Марья, составляет 448 мг/л, а общий расход – 460 л/с. Следовательно, ежесекундно с кальдеры вулкана Берга выносится чуть более 200 г растворенных катионов (без учета влияния атмосферных осадков), что составляет 17.8 т/сут. Площадь распространения термальных вод ограничивается пределами постройки вулкана, а водосборная площадь рек границами кальдеры, что в общей сумме не превышает 8–9 км<sup>2</sup>. Следовательно, химическую эрозию постройки вулкана Берга с участием термальных вод можно оценить в 700-800 т/км²/год. Это примерно на 30 % меньше, чем оценки, полученные для вулкана Эбеко, по стоку р. Юрьева. Минимальная скорость общего химического выветривания (поверхностный сток+гидротермальный) вулкана Эбеко (о. Парамушир) оценена ДЛЯ  $1095\pm200 \text{ т/км}^2/\text{год}$  [9]. Высокие значения для обоих вулканов обусловливаются преимущественно гидротермальной составляющей, в среднем превышающей поверхностную (по продуктивности) более чем в десять раз. К примеру, средняя эрозия речных бассейнов, вне зон современного вулканизма на о. Парамушир, составляет 64±20 т/км<sup>2</sup>/год [9]. Полученные данные носят предварительный характер и требуют дополнительных исследований.

#### Выволы

Постройка активного вулкана Берга вмещает гидротермальную систему, поверхностные проявления которой сосредоточены в открытой на запад кальдере на разном удалении от экструзивного купола и представлены теплыми (Т до 40 °C) кислыми (рН 3.5—3.8) SO<sub>4</sub>-Cl водами, в разной степени разбавленными метеорной водой. Разгрузка вод на поверхности сопровождается интенсивным осаждением железосодержащих минералов, преимущественно феррогидрита с примесью швертманнита.

Источники мыса Ключевого у подножия вулкана Три Сестры разгружают более кислые (pH<3) SO<sub>4</sub>-Cl воды с температурой до 45 °C. Разгрузка вод на поверхности сопровождается осаждением аморфной серы и сульфатсодержащих минералов.

Общий измеренный гидротермальный вынос C1 и SO<sub>4</sub> с вулкана Берга с учетом погрешности измерения расходов составляет  $9\pm1.3$  и  $23.3\pm3.4$  т/сут, источниками мыса Ключевого  $-0.5\pm0.2$  и  $2.3\pm0.8$  т/сут соответственно. Предварительно оцененная химическая эрозия постройки вулкана Берга с участием термальных вод составляет 700-800 т/км<sup>2</sup>/год.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 20-17-00016.

- 1. Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. ред. Н.П. Лаверов М.: Наука,  $2005.\,604$  с.
- 2. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Курильская. Листы L-55-XVIII, XXIV (о. Уруп). Объяснительная записка. 2001. 156 с.
- 3. Taran Y., Kalacheva E. Acid sulfate-chloride volcanic waters; Formation and potential for monitoring of volcanic activity // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2020. V. 405. 107036.
- 4. Taran Y., Zelenski M., Chaplygin I. et al. Gas emissions from volcanoes of the Kuril Island Arc (NW Pacific): Geochemistry and fluxes // Geochemistry, Geophysics and Geosystems, 2018. V. 19(6). P. 1859–1880.
- 5. Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М.: Изд-во Недра, 1990. 480 с.
- 6. Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T. Geochemistry and solute fluxes of volcano-hydrothermal systems of Shiashkotan, Kuril Islands // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 296. P. 40–54.
- 7. Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T. et al. Volcano-hydrothermal system of Ebeko volcano, Paramushir, Kuril Islands: geochemistry and solute fluxes of magmatic chlorine and sulfur // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2016. V. 310. P. 118–131.
- 8. Таран Ю.А., Знаменский В.С., Юрова Л.М. Геохимическая модель гидротермальных систем вулкана Баранского (о-в Итуруп, Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4/5. С. 95–115.
- 9. Taran Y., Kalacheva E. Role of hydrothermal flux in the volatile budget of subduction zone: Kuril arc, NW Pacific // Geology. 2019. V. 47(1). P. 87–90.

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОДЗЕМНЫХ И РЕЧНЫХ ВОД АМУРА И ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПЕРЕТОКИ В ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ ХАБАРОВСКОГО ВОДНОГО УЗЛА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-175-178

Кулаков В.В. $^1$ , Штенгелов Р.С. $^2$ , Матвеенко Д.В. $^1$  Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, vvkulakov@mail.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, rssteng@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты многолетнего мониторинга уровней подземных вод в пределах Хабаровского водного узла в междуречье Амура и Тунгуски. Уточнены параметры взаимодействия подземных вод с Пемзенской протокой. При подпоре подземных вод от протоки в период наводнения среднее значение  $\Delta L$  для верхнего уровня водоносного горизонта составляет 40 м, для среднего уровня — 87 м, а для нижнего уровня — 605 м. Вертикальный водообмен в продуктивной толще в прибрежной зоне протоки характеризуется значениями коэффициента перетока  $0.136~{\rm cyr}^{-1}$  между верхним и средним уровнем наблюдений и  $0.0116~{\rm cyr}^{-1}$  между средним и нижним.

Ключевые слова: подземные воды, уровни, Амур, Тунгусский водозабор.

**Abstract.** The results of long-term monitoring of groundwater levels within the Khabarovsk water hub in the Amur and Tunguska rivers are presented. It is shown that when unloading groundwater into the Pemzenskaya Channel, the average value of  $\Delta L$  for the upper level of the aquifer is 226 m, for the middle level–644 m, and for the lower level–618 m. When groundwater is backed up from the channel during flooding, the average value of  $\Delta L$  for the upper level of the aquifer is 40 m, for the middle level–87 m, and for the lower level–605 m.

Key words: groundwater, levels, the Amur, the Tunguska reservoir.

В Хабаровском водном узле на междуречье Амура и Тунгуски в районе г. Хабаровска в водоносном горизонте плиоцен-нижнечетвертичных аллювиальных отложений (пески, гравий) осуществляется мониторинг подземных вод [2, 3, 4, 7]. Наблюдения осуществляются по девяти кустам наблюдательных скважин внешнего мониторинга, глубиной до 50 м, расположенных на разном удалении от Тунгусского водозабора подземных вод и русла р. Амур.

В пределах Тунгусского водозабора, состоящего из 60 проектных эксплуатационных скважин, выделено пять секций. В центре каждой секции пять кустов наблюдательных скважин внутреннего мониторинга оборудованы аналогично скважинам внешнего мониторинга.

Расстояние от водозаборного ряда эксплуатационных скважин Тунгусского водозабора до кустов № 1004 (в направлении протоки Осиновой), № 1005 (в глубь аллювиальной террасы, навстречу естественному потоку) и № 1006 (в направлении р. Тунгуски) около 2 км соответствует изолиниям прогнозного понижения уровней на 4–5 м при проектном водоотборе из скважин Тунгусского водозабора 1-й очереди в объеме 106 тыс. м³/сутки. Кусты № 1001 и 1002 расположены по кратчайшему направлению от восточного фланга водозаборного ряда эксплуатационных скважин по нормали к урезу Пемзенской протоки (рис. 1).

Ярусные кусты состоят из трех компактно расположенных наблюдательных скважин, ориентированных на разные интервалы водоносного горизонта с расположением интервалов фильтров на глубинах от 12.78 до 15.89 м — для верхнего уровня, 28.79—31.90 м — для среднего уровня и 40.75—43.86 м — для нижнего. Скважины оборудованы фильтрами длиной от 2 до 6 м (в среднем 3.1 м) на трех уровнях разреза.

На всех 14 кустах наблюдательных скважин мониторинга установлены автоматические датчики замера уровней и температуры подземных вод фирмы ПОЛИНОМ типа КЕДР-ДМ v2 с фиксацией параметров каждый час и ежесуточной передачей данных наблюдений через интернет на компьютер.

Режим подземных вод в районе Тунгусского водозабора в предэксплуатационный и начальный периоды эксплуатации (с июля 2012 г.) свидетельствует о незначительном влиянии достигнутого водоотбора на гидродинамическую обстановку.

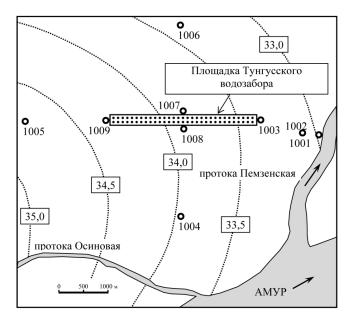


Рис. 1. Схема размещения наблюдательных скважин внешнего мониторинга (№ 1001-1009) с гидроизогипсами естественного потока подземных вод (абс. отм., м) [7].

На площади междуречья Амура и Тунгуски выделяются две зоны: 1 — активного влияния гидрологических факторов от изменения уровня поверхностных вод в протоках Амура — приречный тип режима подземных вод (кусты 1001, 1002, 1003 и 1004), 2 — междуречного режима в основном за счет инфильтрационного питания атмосферными осадками (кусты 1005—1009).

В связи с катастрофическим наводнением на Амуре [1, 8] определяющее влияние на режим уровней подземных вод в 2013 г., наряду с водоотбором подземных вод из части скважин Тунгусского водозабора, оказал подпертый режим естественной фильтрации подземных вод. Амплитуда колебания уровней подземных вод в скважинах куста 1005 достигла 2.97 м (при ее величине 0.52 м в 2012 г.), куста 1006 - 2.10 м (при 0.56 м в 2012 г.). На скважинах кустов 1007 и 1008, расположенных в пределах  $3^{\text{й}}$  секции Тунгусского водозабора, амплитуда достигла 2.52 м (при 0.46 м в 2012 г.).

Максимальные в 2013 г. уровни подземных вод при абсолютной отметке максимального уровня поверхностных вод в р. Амуре на водомерном посту в г. Хабаровске, равной 38.77м (03-04.09.2013 г.), были зафиксированы на отметках 36.74 м (скважина 1002-1-06.09.2013 г.) и 37.73 м (скважина 1004-3-03.09.2013 г.) в приречной зоне. В зоне междуречного режима максимальный уровень подземных вод был зафиксирован на отметке 32.00 м (скважина 1006-2-06.11.2013 г.), расположенной в центре Амуро-Тунгусского междуречья. На пике паводка столб поверхностных вод Амура над устьем скважин куста 1001 составлял около 3 м.

После гребня пика наводнения на Амуре (3-4.09.2013~г.) максимальный уровень подземных вод в скважинах куста 1002 установился через два дня (таблица), в скважинах куста 1004 — через 1-5 дней, в скважинах кустов 1007-1009 — через 10-12 дней (13-15.09.2013~года), в кусте 1006 — через 63 дня (06.11.2013~г.), а в кусте 1005 — через 82 дня (26.11.2013~г.).

Уровни подземных вод в наблюдательных скважинах располагались ниже поверхности земли и уровня поверхностных вод, затопивших территорию. Разница в отметках уровней поверхностных и подземных вод на территории изменялась от 1.5 до 6.5 м. Наличие покровных суглинков в кровле водоносного горизонта на изучаемой территории [6] обусловило затрудненный водообмен между поверхностными и подземными водами, в связи с чем активное и непосредственное влияние паводковых поверхностных вод Амура на подземную гидросферу в пределах Тунгусского водозабора и на прилегающей территории не было отмечено (таблица).

Влияние катастрофического наводнения на р. Амур (2013 год) на подземные воды Амуро-

Тунгусского междуречья [3, 7]

,			A6	солютная отме	тка, м
Пункт наблюдения	Дата максимального уровня в пункте наблюдения	Время от пика наводнения до установления максимального уровня подземных вод, дней	Точки наблюдения	Уровень природных вод	Превышение отметки максимального уровня поверхностных вод над подземными водами
р. Амур (Хабаровск)	03 -04.09.2013		30.67	38.77	_
Куст 1001	?	1?	35.76	?	?
Куст 1002	06.09.2013	2	38.81	36.74	2.03
Куст 1004	03.09.2013	1 –5	38.42	37.73	1.04
Куст 1005	26.11.2013	82	40.25	35.42	3.35
Куст 1006	06.11.2013	63	38.70	32.00	6.77
Куст 1007	13 -15.09.2013	10-12	39.28	32.74	6.03
Куст 1008	13 -15.09.2013	10-12	39.01	33.04	5.73
Куст 1009	13 -15.09.2013	10-12	39.07	32.72	6.05

В связи с многолетней изменчивостью гидрометеорологической обстановки, существенно проявляющейся в районе Хабаровского водного узла, выявление развивающейся депрессии напоров подземных вод в продуктивной толще водоносного горизонта приамурской свиты произведено путем сопоставления годовых синхронов положения уровней, осредненных до среднеполумесячного – среднемесячного состояния.

Анализ данных по скв. № 1003-3, наиболее близко расположенной к действующему водозабору, не показывает существования прогрессирующего развития понижения уровня в период эксплуатации. Уровни подземных вод устойчиво находились на отметках 31–32 м с закономерной реакцией до 33–34 м в осенние периоды высоких паводков на Амуре 2019–2020 гг. По состоянию на конец 2020 г. можно сделать вывод об отсутствии на площади внешнего мониторинга значимого проявления депрессии напоров в продуктивной водоносной толще Тунгусского месторождения подземных вод.

По синхронным данным наблюдений на всех трех уровнях наблюдений в скв. № 1001-1, 2, 3 и 1002-1, 2, 3 с учетом реальной пространственной структуры потока подземных вод выполнен детальный анализ вертикальных перетоков в разрезе продуктивной толщи и направленности взаимодействия с протокой Пемзенской (рис. 2). При разгрузке подземных вод в протоку вертикальные перетоки восходящие. В случае подпора от протоки при наводнениях и инфильтрации поверхностных вод в водоносный горизонт — вертикальные перетоки нисходящие.

Выполнена оценка параметра эквивалентной длины  $\Delta L$  по каждому уровню наблюдений (1, 2 и 3) в скважинах кустов № 1001 и 1002 за период 2012–2020 гг. Количество доступных оценок по состоянию подпора от протоки (1359) более чем в пять раз превышает количество оценок по состоянию разгрузки подземных вод в протоку (251), что позволяет считать эти оценки более достоверными.

Установлено, что при подпоре подземных вод от протоки Пемзенской в период наводнения среднее значение  $\Delta L$  для верхнего уровня водоносного горизонта составляет 40 м, для среднего уровня — 87 м, а для нижнего уровня — 605 м.

Эти оценки дают возможность проверки параметров вертикального строения продуктивной толщи  $\chi_0$ ,  $\chi_{00}$ , принятых при подсчете запасов подземных вод Тунгусского месторождения [5]. Значение коэффициента перетока  $\chi_0$  между верхним и средним уровнями

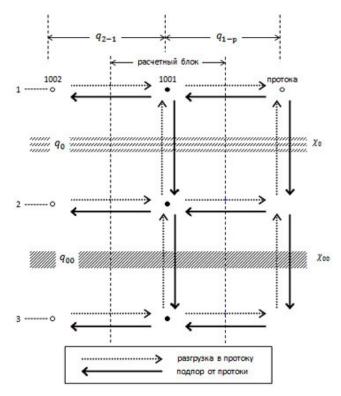


Рис. 2. Конечно-разностная схема взаимодействия подземных вод с протокой.

наблюдений равно  $0.136~{\rm cyr}^{-1}$ , что абсолютно удовлетворительно совпадает с принятым по результатам разведки месторождения ( $0.15~{\rm cyr}^{-1}$ ). Расчет для интервала между средним и нижним уровнем показал, что коэффициент перетока  $\chi_{00}=0.0116~{\rm cyr}^{-1}$ , что примерно вдвое меньше полученного при разведке ( $0.025~{\rm cyr}^{-1}$ ) для участка водозабора и свидетельствует либо о пропорциональном уменьшении коэффициента фильтрации, либо о возрастании мощности разделяющего слоя.

- 1. Ким В.И., Махинов А.Н. Гидрологический режим р. Амур в пределах Хабаровского водного узла // Материалы научной конференции «Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов». Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. С. 92–94.
- 2. Кулаков В.В., Андреева Д.В., Козырев Р.С., Матвеенко Д.В., Штенгелов Р.С. Мониторинг естественного и нарушенного режима подземных вод в Амуро-Тунгусском междуречье // Конф, с международн. участием. «Регионы нового освоения: Естественные сукцессии и антропогенная трансформация природных комплексов», 4—7 октября 2017 г., Хабаровск: Сб. материалов. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2017. С. 165—168.
- 3. Кулаков В.В., Медведева Н.И. Влияние катастрофического наводнения на уровень подземных вод Амуро-Тунгусского междуречья // Всероссийская конференция «Водные и экологические проблемы, преобразование экосистем в условиях глобального изменения климата», 29.09 3.10.2014 г. Хабаровск: сб. докладов [Электронный ресурс]. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2014. С. 101–103.
- 4. Кулаков В.В., Тесля В.Г., Штенгелов Р.С. Тунгусское месторождение подземных вод Хабаровского водного узла // Сборник докладов 7-го международного конгресса ЭКВАТЭК-2006 «Вода: экология и технология». М., Часть 1, 2006. С. 255–256.
- 5. Кулаков В.В., Штенгелов Р.С. Оценка запасов пресных подземных вод в речных долинах Приамурья // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием (XIX Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока), Тюмень, 2009. С. 254–257.
- 6. Кулаков В.В., Штенгелов Р.С. Покровные отложения Амуро-Тунгусского междуречья биогеохимический барьер от загрязнения подземных вод // Биогеохимия и гидроэкология наземных и водных экосистем. Вып. 21. [Электронный ресурс]. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2015. С. 80 87.
- 7. Кулаков В.В., Штенгелов Р.С. Мониторинг уровней подземных вод междуречья Амура и Тунгуски // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2019.  $\mathbb{N}$  3. С. 63 70.
- 8. Махинов А.Н., Ким В.И., Воронов Б.А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестник ДВО РАН. 2014. № 2. С. 5–14.

### ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ( $\delta^{13}$ С, $\delta^{15}$ N, $\delta^{18}$ О и $\delta^{2}$ Н) АЗОТНЫХ И УГЛЕКИСЛЫХ ВОД ЗАБАЙКАЛЬЯ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-179-183

Лаврушин В.Ю., Челноков Г.А., Брагин И.В., Айдаркожина А.С. Геологический институт РАН, Москва, v lavrushin@ginras.ru

Аннотация. Представлены материалы исследования углекислых и азотных вод Забайкалья, полученные в результате проведения полевых работ в  $2020~\rm r$ . Были исследованы химические характеристики воды и газов, и определены значения  $\delta^{13}{\rm C}$ ,  $\delta^{18}{\rm O}$  и  $\delta^2{\rm H}$  в водной фазе. Для газов Забайкалья впервые были определены значения  $\delta^{15}{\rm N}$  в азоте газов минеральных вод. Отмечены резкие различия углекислых и азотных вод по составу и изотопным характеристикам водной фазы. Они отражают как географическую зональность их инфильтрационного питания, так и различия в гидрогеологическом режиме формирования вод разного типа. Показано, что азотные воды представляют собой классические гидрогеологические системы, движение вод в которых происходит от областей питания к областям разгрузки. Для углекислых вод эта тенденция выражена менее ярко. Есть признаки участия в водном балансе последних вод деградирующей мерзлоты. Возможно, она представлена газогидратами  ${\rm CO}_2$ . Исследования изотопного состава азота в газах углекислых вод показали, что в газах Забайкалья, в отличие от других провинций минеральных вод, связанных с проявлениями молодого вулканизма, отсутствуют однозначные признаки участия в газовой фазе азота мантийного происхождения.

Ключевые слова: углекислые и азотные минеральные воды Забайкалья, изотопный состав азота.

Abstract. The results of the Transbaikalia  $CO_2$ -rich and  $N_2$ -rich mineral waters investigations, obtained during field work of 2020 are presented. Chemical characteristics of water and associated gases and also values of  $\delta 13C$ ,  $\delta 18O$ ,  $\delta 2H$  in the water were determined. The  $\delta^{15}N$  in the gases of the mineral waters of Transbaikalia were determined for the first time. Sharp differences between chemical composition and isotopic characteristics of  $CO_2$ -rich and  $N_2$ -rich waters were noted. These discrepancies reflect both the geographical zonality of their catchment basins and the unique hydrogeological conditions for various water types' formation. It is shown that  $N_2$ -rich waters are classical hydrogeological systems, the movement of water in which comes from the recharge to discharge areas. For  $CO_2$ -rich waters, this trend is less pronounced. There are signs of degrading permafrost waters participation in the water balance of the  $CO_2$ -rich waters. The presence of  $CO_2$ -gas hydrates is not excluded. Studies of the isotopic composition of nitrogen in the associated gases of  $CO_2$ -rich waters have shown that in the gases of Transbaikalia, unlike other mineral water provinces associated with manifestations of young volcanism, there are no unambiguous signs of mantle origin nitrogen.

Key words: CO<sub>2</sub>-rich and nitrogen mineral waters of Transbaikalia, nitrogen isotopic composition.

Азотные термальные и холодные углекислые воды широко распространены на территории Республики Бурятия и Забайкальского края. Эти объекты уже продолжительное время являются предметом изучения (например, работы М.П. Михайлова, Н.И. Толстихина, В.В. Иванова, Л.Н. Барабанова, В.Н. Дислера, Е.В. Пиннекера, А.П. Карасевой, И.С. Ломоносова и др.), и интерес к проблемам их формирования не ослабевает до сих пор (см. работы С.Л. Шварцева, А.М. Плюснина, Л.В. Заманы и др.).

Вместе с тем в последние годы благодаря внедрению в практику геохимических исследований высокопроизводительной приборной базы многие виды геохимических исследований, которые ранее относились к группе уникальных, перешли в разряд рутинных. К таким исследованиям относятся плазменно-масс-спектрометрические определения макро-и микрокомпонентного состава вод, определения изотопного состава кислорода и водорода воды, изотопного состава азота ( $\delta^{15}N$  в  $N_2$ ) и углерода в воднорастворенных формах  $CO_2$  и в газах ( $CO_2$  и  $CH_4$ ) и др. Результаты этих исследований могут дать новую информацию о гидрогеологических условиях формирования вод разного типа и генезисе некоторых компонентов солевого и газового состава. В данной работе приводятся результаты сравнительного исследования геохимических особенностей углекислых и азотных вод Забайкалья (Республика Бурятия и Забайкальский край).

В августе 2020 г. на территории Забайкалья было опробовано 13 азотных термальных источников, в основном ассоциирующихся с Байкальской рифтовой зоной (далее БРЗ), и 18 углекислых источников. Последние локализовались как на территории Забайкальского края, так и в южной части БРЗ (Тункинская впадина). В собранной

коллекции проб воды и газов были проанализированы химические составы, а также выполнена серия определений  $\delta^{18}$ O и  $\delta^{2}$ H в воде,  $\delta^{13}$ C в HCO<sub>3</sub>- и  $\delta^{15}$ N в азоте.

Температура исследованных азотных источников варьировалась от 31 до 75 °C. Углекислые водопроявления характеризовались диапазоном температур от 1 до 54 °C. Термы углекислого состава в основном связаны с Тункинской впадиной (ист. Аршан и Жемчуг), редко они встречаются и на территории Забайкальского края (ист. Ямкун). Особенностью остальных углекислых водопроявлений является аномально низкая температура воды – от 1 до 3 °C. Углекислые воды так же часто характеризуются очень низкой минерализацией воды – 80...690 мг/л. Отмечена прямая зависимость между температурой и концентрацией С1 (рис. 1) и обратная с концентрацией Са<sup>2+</sup>. Наличие подобных зависимостей может быть объяснено или деградацией залежей газогидратов СО<sub>2</sub>, или взаимодействием углекислых вод с водами деградирующей мерзлоты.

Исследования особенностей формирования водного баланса минеральных источников (азотных и углекислых) были выполнены по результатам изотопных исследований О и Н (таблица). Наши данные в общем совпадают с ранее полученными [1–3]. Было показано, что в водном балансе всех типов вод доминируют воды инфильтрационного генезиса (рис. 2). При этом холодные углекислые воды Забайкалья отличаются от термальных азотных терм БРЗ более высокими значениями  $\delta^{18}$ О и  $\delta^{2}$ Н. Такая же тенденция прослеживается и для изотопных характеристик поверхностных вод, поэтому обнаруженные различия для углекислых и азотных вод являются отражением региональных вариаций изотопных характеристик инфильтрационного питания минеральных вод.

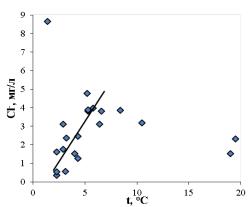


Рис. 1. Зависимость концентрации Cl-иона от температуры воды в углекислых источниках Забайкальского края. Линией показан тренд зависимости [Cl-] от t.

Для поверхностных и минеральных вод Забайкалья установлены пространственные закономерности изменения изотопных характеристик воды по географической долготе и широте. Установлен рост значений  $\delta^2 H$  и  $\delta^{18} O$  в южном и восточном направлениях. Эти тенденции являются следствием ландшафтно-климатической зональности Забайкалья. Здесь при переходе от таежной к лесостепной и степной зоне происходит существенное изменение количества атмосферных осадков, влажности и среднегодовых температур воздуха, что сильно влияет на изотопные характеристики  $\delta^2 H$  и  $\delta^{18} O$  атмосферных вод.

Сопоставление характеристик воды озера Байкал ( $\delta^2 H = -123 \pm 2$  и  $\delta^{18}O = -15.8 \pm 0.2$  % [4]) со значениями  $\delta^{18}O$  и  $\delta^2 H$  в термальных источниках, расположенных на побережье озера (ист. Змеиные, Кулиных болот, Сухая Загза), показало, что их воды заметно отличаются от воды озера (таблица). Это указывает на то, что вода озера Байкал не участвует в формировании водного баланса прибрежных терм. Это является косвенным подтверждением того, что в циркуляционных системах азотных терм движение вод осуществляется не под влиянием конвективных токов воды, возникающих в областях локальных термоаномалий, а под воздействием градиента напоров, обусловленного различиями в положении высотных отметок областей разгрузки и областей питания. Иными словами, циркуляция воды в системах азотных терм обеспечивается исключительно гидрогеологическими факторами.

Выявлены принципиальные различия в соотношениях изотопных характеристик поверхностных и различных типов минеральных вод. В углекислых водах значения  $\delta^{18}$ O и

 $\delta^2$ Н почти не отличались от наблюдаемых в местных поверхностных водотоках (рис. 2). Значения же  $\delta^{18}$ О и  $\delta^2$ Н в азотных водах, напротив, были, как правило, существенно ниже, чем в ближайших к источникам реках.

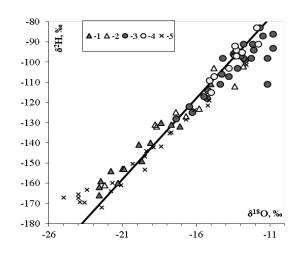


Рис. 2. Изотопные характеристики воды азотных терм (1) и рек (2) БРЗ, углекислых источников (3) и рек (4) Забайкальского края, а также азотных терм БРЗ (5) по [5].

Если допустить, что изотопные характеристики воды азотных терм существенно не менялись во времени и они соответствуют современным инфильтрационным водам (возраст терм невелик), то, исходя из известных градиентов изменения изотопного состава О и Н осадков, выпадающих на разных высотных отметках, превышение областей питания исследованных источников над областями их разгрузки можно оценить в диапазоне от  $\sim 300$  до 1500 м.

Наши исследования состава азотных вод не подтвердили существование ранее обнаруженной зависимости значений  $\delta^{18}$ O от концентраций Si [3, 5]. Вместе с тем о наличии такой зависимости можно говорить, если анализировать данные не только по азотным, но и по углекислым водам. Однако эта зависимость, по нашему мнению, носит парагенетический характер. Очевидно, она обусловлена региональными различиями изотопных характеристик воды: углекислые воды холодные, поэтому характеризуются низкими значениями Si, но при этом в силу географических факторов значения  $\delta^{18}$ O в них существенно выше, чем в азотных водах. Вероятно, выявленная ранее обратная зависимость между значениями  $\delta^{18}$ O и концентрацией Si в воде отражает не процессы взаимодействия в системе «вода — порода», а процессы смешения инфильтрационных холодных поверхностных вод с низкими значениями  $\delta^{18}$ O и Si и термальных вод. Формирование последних происходит на более высоких абсолютных отметках, поэтому они характеризуются более низкими значениями  $\delta^{18}$ O в H<sub>2</sub>O, но из-за большей температуры в них отмечена более высокая концентрация Si.

Вместе с тем обнаруживается зависимость значений  $\delta^{18}$ O и  $\delta^2$ H от концентрации Cluoha. Она, как и зависимость Cl $^-$  от t (см. рис. 1), указывает на участие мерзлотных или газогидратных вод в формировании водного баланса углекислых источников.

Исследование изотопного состава углерода в воднорастворенных формах  $CO_2$  показало резкое различие азотных и углекислых вод по  $\delta^{13}C$ . Для азотных характерны отрицательные значения  $\delta^{13}C(HCO_3)$  от -18.8 до -5.0 %, а для углекислых – положительные – до +7 %. В речных водах значения  $\delta^{13}C(HCO_3)$  меняются от -3.5 до -18.8 %.

Для минеральных вод отмечена тенденция роста значений  $\delta^{13}$ C с увеличением концентрации  $HCO_3^-$ . В целом, эти исследования показали, что в азотных водах ион  $HCO_3^-$  имеет смешанный генезис. В основном его концентрация формируется за счет атмосферной и биогенной  $CO_2$  (продуктов окисления органики). В углекислых водах ведущую роль в составе  $HCO_3^-$  играют глубинные источники  $CO_2$  (вулканогенно-метаморфогенные?).

В собранной коллекции газов впервые был определен изотопный состав азота (таблица). Значения  $\delta^{15}N$  в газах азотных вод менялись от +0.1 до +0.9 ‰. В газе с высоким содержанием СН<sub>4</sub> из скв. Сухая Загза  $\delta^{15}N=-1.0$  ‰. Газы углекислых вод характеризуются более широким диапазоном  $\delta^{15}N-$  от -1.2 до +1.7 ‰.

Изотопные характеристики водной и газовой фазы азотных и углекислых минеральных вод Забайкалья

	Т,	$\delta^{13}C_{TDI}$	$\delta^{18}$ O,	δD,	Ar,	$N_2$ ,	CH <sub>4</sub> ,	$CO_2$ ,	$\delta^{15}$ N,
Пункт отбора	°C	С <b>%</b> 0	<b>%</b> o	<b>‰</b>	%	%	%	%	<b>%</b> 0
Загза скв.	51.5	5.4	-17.1	-132	0.16	7.9	91.7	0.146	-1.0
Питателевский, скв.	65.0	-12.3	-19.7	-149	1.41	96.7	0.28	0.072	0.7
ист. Змеиный 1	31.2	-12.9	-22.5	-159	1.40	98.1	0.35	0.013	0.5
Кучегер, ист.	39.5	-8.0	-19.1	-140	1.45	97.5	0.88	0.014	0.8
Умхей, ист.	45.0	-10.8	-17.7	-131	1.35	98.3	0.21	0.016	0.6
Гусихинский, скв.	75.3	-5.0	-20.9	-153	1.67	97.4	0.10	0.271	0.1
ист. Горячинск	53.1	-18.8	-21.3	-160	1.50	98.1	0.20	0.052	0.6
Былыринский ист.	34.0	-17	-15.0	-111	1.48	97.7	0.14	0.144	0.9
Аршан, скв. 41	45.7	3.7	-15.3	-118	0.10	2.5	0.066	97.3	-0.5
Аршан, скв. 39	43.0	5.7	-16.5	-122	0.02	1.3	0.030	98.6	-0.5
Аршан, скв. 34	11.8	6.0	-17.4	-128	0.63	43.2	0.14	52.7	0.0
Аршан, скв. 35	14.0	7.0	-16.3	-125	0.04	1.4	0.026	98.5	0.6
Жемчуг, скв.	54.7	1.3	-11.2	-111	0.05	2.4	0.170	97.4	0.6
Погромнинский	4.3	5.8	-12.7	_99	0.73	49.1	0.004	50.0	0.6
Борзихинский, скв. 7	5.8	1.4	-12.1	-94	0.06	6.6	0.011	93.3	1.5
Кука, скв. 46	5.2	1.1	-10.8	-93	0.04	4.4	0.005	95.5	1.3
Шиванда, скв. 27	6.4	1.5	-12.8	-91	0.13	5.7	0.093	94.1	0.0
Шиванда, скв. 2-62/60	3.2	5.2	-13.5	-96	0.01	0.4	0.009	99.6	1.7
Ямкун, озеро с минеральной водой	19.5	4.1	-14.3	-106	0.80	63.1	0.308	35.5	0.9
Ямкун, скв.	19.0	3.8	-13.8	-107	0.01	0.4	0.009	99.6	0.5
ист. Бурукан	3.1	6.6	-12.8	-98	0.87	71.3	0.003	27.2	-1.2
ист. Базановский	8.4	3.6	-13.0	-97	0.19	11.0	3.9	84.7	1.3
Новоорловск, скв.	2.3	2.2	-11.2	-98	0.07	5.1	0.15	94.7	1.6
Мордой, ист.	6.6	-4.5	-11.7	-83	0.08	4.0	0.0004	95.9	0.2
Улей, ист.	10.5	-0.5	-12.2	-91	0.06	1.9	0.008	98.0	-1.2
Улей, выход 2, озеро	_	_	_	_	0.08	5.0	0.093	94.8	-0.5
Дарасун, скв.	5.3	3.0	-13.2	-103	0.01	1.0	0.013	98.9	0.0
ист. Засуланский	2.3	-2.2	-13.4	-95	0.45	34.2	0.63	64.7	1.5
ист. Молоковка	2.9	-0.9	-11.5	-87	0.25	15.6	0.001	84.1	0.7
ист. Кадала (Чита)	1.4	-3.9	-10.8	-86	1.07	84.6	0.022	14.3	0.3

Минимальные отрицательные значения отмечены только в ист. Бурукан и Улей. Остальные углекислые газы Забайкальского края характеризуются значениями >0 ‰. Для них обнаружены корреляционные взаимосвязи значений  $\delta^{15}N$  с концентрациями  $HCO_3^-$ , редкоземельных металлов и значениями Eh. Эти связи, вероятно, отражают интенсивность процессов денитрификации, протекающих при разных Eh, и/или процессы разбавления углекислых вод инфильтрационными водами, насыщенными атмосферным азотом.

Считается, что углекислые воды имеют вулканогенный генезис, который в том числе подтверждается и присутствием в газах Забайкалья той или иной примеси мантийного гелия [6–9]. Однако наши определения показали, что азот в газовой фазе углекислых вод кардинально отличается по своим изотопным характеристикам от азота верхней мантии ( $\delta^{15}N_{\text{мант}} = -5\pm2$  % [10]). Он, скорее, оказывается аналогом газов островодужных систем ( $\delta^{15}N = -2...+6$  %) и/или газов кристаллических пород древней континентальной коры ( $\delta^{15}N$ 

 $=+6.0\pm6.7\%$ ), причем в сравнении с азотными термами в газах углекислых вод отмечаются даже более высокие значения  $\delta^{15}$ N. Это может быть следствием некоторых различий в геологическом строении областей развития азотных и углекислых вод, а также указывать на дополнительные источники корового азота в углекислых системах. Генезис этого азота определить трудно. Он может быть связан как с потоком глубинных флюидных систем, выделяющихся, например, из погруженных в мантию коровых слэбов, так и с плавлением нижних частей континентальной коры. Однако неатмосферный азот может иметь и субповерхностное происхождение, как в азотных водах. В последнем случае его генезис будет связан с денитрификацией продуктов разложения органических веществ.

Теоретически небольшую примесь мантийного азота можно предполагать в газах Тункинского Аршана и то лишь потому, что здесь примесь мантийного гелия достигает максимальных значений ( $^3$ He/ $^4$ He =  $1100\times10^{-8}$ ). В термальных скважинах Аршана значения  $\delta^{15}$ N составляют –0.5 ‰, в то время как в скважинах с более холодной водой значения  $\delta^{15}$ N повышаются до 0...+0.6 ‰. Более низкие значения  $\delta^{15}$ N = -1.2 ‰, полученные для источников Бурукан и Улей, трудно однозначно интерпретировать. В сравнении с другими газопроявлениями они не выделяются экстремальными значениями  $^3$ He/ $^4$ He, поэтому азот здесь может иметь как коровый (продукт разложения органического вещества), так и мантийный генезис.

### Выводы

Проведенные исследования показали существенные различия в формировании водного и углеродного баланса углекислых и азотных вод. Исследование температур, солевого и изотопного состава углекислых вод также указывает на участие в их водном балансе вод, связанных с мерзлотой. Мы также не исключаем возможности того, что углекислые источники Забайкальского края могут быть связаны с деградирующими залежами газогидратов  $CO_2$ . Новые данные об изотопном составе азота в газах Забайкалья показали, что в них часто присутствует примесь азота неатмосферного происхождения. Этот азот имеет коровый генезис, причем он присутствует повсеместно не только в азотных, но даже в газах углекислых вод, генезис которых традиционно связывается с молодой магматической активностью, поэтому происхождение избыточного  $N_2$  в углекислых водах требует дополнительного уточнения.

Исследование углекислых вод Забайкальского края выполнено в рамках проекта РНФ № 18-17-00245 $\Pi$ , а азотных термальных вод — гранта РФФИ № 20-05-00727.

# Список литературы

- 1. Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 5. С. 647–664.
- 2. Плюснин А.М., Чернявский М.К., Посохов В.Ф. Условия формирования гидротерм Баргузинского Прибайкалья по данным микроэлементного и изотопного состава // Геохимия. 2008. № 10. С. 1063–1072.
- 3. Замана Л.В. Дейтерий и кислород-18 воды азотных терм Баунтовской группы (Байкальская рифтовая зона) // Вестник БГУ. 2011. № 3. С. 87–90.
- 4. Seal R.R. II, Shanks W.C. III. Oxygen and hydrogen isotope systematics of Lake Baikal, Siberia: implication for paleoclimate studies // Limnol. Oceanogr. 1998. V. 43. P. 1251–1261.
- 5. Замана Л.В. Изотопный состав водорода и кислорода азотных гидротерм Байкальской рифтовой зоны с позиций взаимодействия в системе вода порода // ДАН. 2012. Т. 442, № 1. С 102–106.
- 6. Ломоносов И.С., Мамырин Б.А., Прасолов Э.М., Толстихин И.Н. Изотопный состав Не и Ar в некоторых гидротермах Байкальской рифтовой зоны // Геохимия, 1976. № 11. С. 1743-1746.
- 7. Pinneker E.V., Pissarskiy B.I., Pavlova S.E. Helium isotope data for the ground waters in the Baikal rift zones // Isotopes Environ. Health Stud. 1995. V. 31. P. 97–106.
- 8. Поляк Б.Г., Прасолов Э.М., Толстихин И.Н., Козловцева С.В., Кононов В.И., Хуторской М.Д. Изотопы гелия во флюидах Байкальской рифтовой зоны // Известия РАН, сер. геол. 1992. №. 10. С. 18–33.
- 9. Лаврушин В.Ю., Поляк Б.Г., Каменский И.Л. Изотопы гелия в термоминеральных флюидах Забайкалья // Литол. и полезн. ископ. 1999. № 2. С. 146–157.
- 10. Cartigny P., Marty B. Nitrogen Isotopes and Mantle Geodynamics: The Emergence of Life and the Atmosphere- Crust-Mantle Connection // Elements. 2013. V. 9. P. 359–366.

# ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ( $\delta^{18}$ О, $\delta$ D, $\delta^{13}$ С, $\delta^{34}$ S) ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТЕРРИТОРИИ ТОРЕЙСКИХ ОЗЕР (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-184-188

Лепокурова О.Е. $^{1,2}$ , Борзенко С.В. $^3$ , Дребот В.В. $^{1,2}$ 

<sup>1</sup>Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Томск, LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru, DrebotVV@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск <sup>3</sup>Институт природных ресурсов, экологии и криологии CO PAH, Чита, svb\_64@mail.ru

Аннотация. В статье приведены новые данные по изотопному составу (Н и О) подземных вод верхней гидродинамической зоны района Торейских озер, а также растворенных С и S. На основе полученных результатов, а также данных по озерным, частично метеорным водам сделаны выводы о генезисе и условиях формирования. Отмечен достаточно однородный изотопный состав подземных вод, несмотря на различия химического. При этом общая эволюция состава в направлении «атмосферные – подземные – озерные воды» характеризуется, кроме увеличения солености и рН, обогащением изотопами <sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>13</sup>C.

**Ключевые слова:** подземные воды верхней гидродинамической зоны, изотопный состав, Торейские озера, Восточное Забайкалье, генезис.

**Abstract**. New data on the isotopic composition (H and O) of groundwater in the Torey Lakes region's upper zone and dissolved C and S were presented in the article. The conclusions about the origin and formation conditions of groundwater were presented based on previous study and lakes' and meteoric water's isotopic data. It is noted that the groundwater's isotopic composition is quite homogeneous, despite the chemical differences. In this case, the general evolution of the composition in the direction of "atmospheric – underground – lake waters" is characterized, in addition to an increase in salinity and pH, by enrichment in isotopes <sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>13</sup>C.

**Key words**: groundwater of the upper dynamic zone, isotopic composition, Torey lakes, Eastern Transbaikalia, origin.

# Введение

Территория Юго-Восточного Забайкалья интересна, прежде всего, широким распространением разнообразных по составу и солености озер. Однако и для подземных вод, благодаря засушливому климату и наличию трещиноватых вулканогенных структур, обеспечивающих смешение с озерными водами, характерно широкое разнообразие химического состава уже на первых этапах взаимодействия системы «вода — порода» начиная с первых метров глубины. В рамках изучения условий формирования состава подземных вод верхней гидродинамической зоны [1, 2] на данном этапе задачей было детально изучить стабильные изотопы воды ( $\delta^{18}$ O,  $\delta$ D) и растворенного углерода и серы ( $\delta^{13}$ C,  $\delta^{34}$ S) для понимания их генезиса и эволюции.

## Объект и методы исследований

Район исследований приурочен к территории водосборных бассейнов бессточных озер Зун- и Барун-Торей и простирается в пределах от 49° до 51° с.ш. и от 114° до 117° в.д. Основной особенностью природных условий здесь является резко континентальный, засушливый климат, а значит, в формировании химического состава вод огромную роль играет испарение, ускоряющее процессы взаимодействия. Обрамляющая Тореи территория сложена песчано-глинистыми маломощными отложениями, перекрывающими эффузивно-осадочные меловые породы, выходящие на дневную поверхность в районе озер. Интенсивная трещиноватость вулканогенных структур обеспечивает смешение озерных, речных и подземных вод.

Полевые работы проходили в летние периоды 2018 и 2019 гг. Основной акцент был на отбор подземных вод, однако без изучения озерных и речных вод исследование было бы неполным. Всего на изотопный состав, но не на все виды анализов, отобрана 1 речная проба (р. Борзя), 8 озерных и 37 подземных (родники, колодцы и скважины глубиной до 70 м). Химический состав поверхностных водных объектов территории, а также обоснование проведения линии LMWL (см. ниже) были подробно представлены в работах [2, 3].

Аналитические исследования химического состава вод (макрокомпоненты) были выполнены в аттестованной лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН.

Изотопные исследования воды были выполнены в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН на масс-спектрометре Finnigan-MAT 252 (Германия). Результаты приводятся в промилле (‰) относительно стандарта SMOW для  $\delta^{18}$ O,  $\delta$ D; PDB – для  $\delta^{13}$ C и CDT для  $\delta^{34}$ S. Погрешность анализа  $1\sigma$  по кислороду  $\pm 0.15$  ‰, по водороду –  $\pm 1.2$  ‰, по углероду и сере –  $\pm 0.1$  ‰. Выполнены 33 определения  $\delta^{18}$ O и  $\delta$ D,  $32 - \delta^{13}$ C и  $\delta^{18}$ O гидрокарбонат-иона (HCO3<sup>-</sup> + CO3<sup>2-</sup>),  $9 - \delta^{34}$ S в сульфатах (SO4<sup>2-</sup>) и 1 - B S<sup>2-</sup> в сульфидах.

В предыдущих работах установлено, что в направлении атмосферные – речные – подземные – озерные воды увеличивается соленость (от 10 мг/л до 120 г/л) и значение рН (от 5.0 до 9.9), накапливается Si (до 130 мг/л), из макрокомпонентов сначала превалируют  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , затем  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  и далее  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Cl}^-$ . Также в этом направлении увеличиваются концентрации некоторых микрокомпонентов.

Атмосферные осадки относятся к ультрапресным (10–50~мг/л), слабокислым (pH 5.0–6.5), сложного катионного и анионного состава, но в основном преобладают  $HCO_3^-$  и  $Na^+$ . Речные воды (реки Онон и Борзя) характеризуются низкой минерализацией (10–47~мг/л) и слабощелочной средой (pH 7.4–8.2), по составу гидрокарбонатные кальциево-натриевые. Подземные воды верхней гидродинамической зоны отличаются большим разбросом значений pH и солености. Выделяются условно два типа вод: 1) с минерализацией 0.17–0.85~г/л и pH 7.4–8.5, по составу  $HCO_3$ , но сложного катионного состава (Ca, Na, Mg) и 2) с минерализацией 0.61–4.87, pH 7.8–8.9, по составу в основном  $HCO_3$ -Na (из катионов превалирует натрий), реже в анионном составе появляется  $SO_4^{2-}$  и  $CI^-$  ( $HCO_3$ -SO<sub>4</sub>-Na,  $HCO_3$ -Cl-Na). Озерные воды отличаются еще большим разбросом солености от 1 до 131 г/л, но достаточно узким диапазоном pH от 8.9 до 9.9. Состав при этом очень разнообразен: анионный варьируется –  $HCO_3$ , CI-SO<sub>4</sub>,  $SO_4$ -Cl, Cl, в катионном преобладает всегда Na. Более подробно химический состав вод представлен в работе [1].

# Результаты исследований и их обсуждение

В питании подземных вод могут участвовать воды различного генезиса: прежде всего метеорные (атмосферные и речные), а также озерные, седиментационные, магматогенные и прочие. В изучаемых условиях можно исключить глубинные источники. В рамках данного исследования интерес представляет выявление доли озерного питания. Величины  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  подземных вод варьировались в достаточно узком интервале значений: от -101 до -70 ‰ и от -13.7 до -8.0 ‰ соответственно (таблица). Хотя мы по химическому составу и разделили воды на два типа, по изотопному составу особые отличия не были выявлены, и даже средние значения практически идентичны. Диапазон вариаций изотопного состава озерных вод отличается от подземных: от -4.3 до 1.5 ‰ для кислорода и от -49 до -18 ‰ для водорода.

Изотопный состав природных вод района Торейских озер и водорастворенных веществ, ‰

Водные объекты			да	HC	$O_3^-$	$SO_4^{2-}$	$S^{2-}$	
Бодны	е ооъекты	$\delta^{18}O_{SMOW}$	$\delta D_{SMOW}$	$\delta^{13}C_{PDB}$	$\delta^{18} O_{SMOW}$	$\delta^{34} S_{CI}$	DT	
Река Б	орзя	_	_	-13,2	-1,6	_	_	
Озерні	ые воды территории	- <u>4.31.5</u> -1.7 (8)	<u>-4918</u> -34 (8)	- <u>7.62.1</u> <u>26.329.3</u> -3.3 (7) <u>27.5 (7)</u>		3.317.5 8.1 (6)	-19.6	
Подземные воды	<i>I muna</i> пресные HCO <sub>3</sub> (Ca, Na, Mg)	- <u>13.78.0</u> -12.1 (13)	- <u>10172</u> -91 (13)	- <u>13.78.9</u> -11.0 (17)	17.822.2 19.2 (17)	8.3	_	
	II muna солоноватые HCO <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> -Cl) Na	- <u>13.78.9</u> -11.8 (11)	- <u>9870</u> -91 (13)	- <u>13.88.5</u> -10.7 (7)	18.824.3 20.3 (7)	5.88.8 7.3 (2)	_	

Примечание. В числителе – мин. и макс. значения, в знаменателе – среднее, в скобках – количество проб. Прочерк – нет данных.

При нанесении полученных данных на график зависимости  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  (рис. 1) можно сделать следующие выводы. Большая часть подземных вод территории имеет метеорный генезис, о чем свидетельствует их распределение вдоль локальной (LMWL) [4] и глобальной (GMWL) линий метеорных вод (на этом участке они практически совпадают).

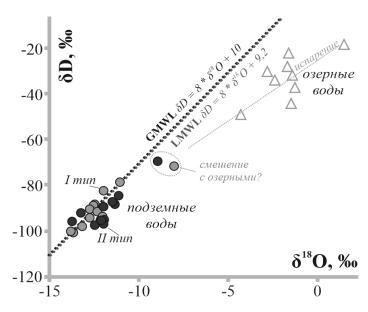


Рис. 1. Распределение изотопов Н и О в подземных и озерных водах района.

Исключение составляют две фигуративные точки, отклоненные по линии метеорных вод вверх, и одна даже с небольшим (1.4 ‰) кислородным сдвигом. Объяснение этого будет чуть ниже. Если исключить эти точки, то диапазон изменений величин  $\delta D$  и  $\delta^{18} O$  для подземных вод будет уже: от -101 до -79 ‰ и от -13.7 до -11.1 ‰ соответственно.

Озерные воды, несмотря на питание их метеорными водами, в результате испарительных процессов, а именно изотопно-обменных реакций при фазовом переходе «вода — пар», приобретают тяжелый изотопный состав, при этом линия тренда имеет более пологий наклон (рис. 1). т.е. величина  $\delta^{18}$ О утяжеляется больше, чем  $\delta$ D. Этот уклон характерен для

открытых водоемов. склонных к испарению [5], в результате которого в пар переходят более легкие изотопы воды.

Две вышеописанные аномальные фигуративные точки подземных вод как раз попадают на линию смешения метеорных и озерных вод (рис. 1). При этом данные пробы отличаются относительно невысокими значениями минерализации (0.46 и 0.91 г/л) и рН (8.4 и 8.0). Если в принципе сравнивать величину  $\delta^{18}$ О (можно и  $\delta$ D, но первая будет более выразительна) всех вод с показателями общей солености и кислотно-щелочными условиями, то можно увидеть следующую картину на рисунке 2, a,  $\delta$ . При общей эволюции системы «воды зоны активного водообмена — озерные воды» тенденция очевидна: увеличивается минерализация и рН вод, утяжеляется изотопный состав воды. Однако если рассматривать только подземные воды, такая зависимость не так очевидна, видимо из-за недостаточной представительности выборки. При этом на графиках опять выделяются две аномальные точки, попадающие на линию смешения с озерными водами (рис. 2), но только по  $\delta^{18}$ О, по  $\delta$ D несильно выделяются.

Были исследованы зависимости изотопного состава вод от пространственного расположения. Латеральная зональность не выражена, поскольку территория небольшая и расположены водные объекты достаточно близко. Немного проявилась высотная изотопная зональность. В предыдущих работах указывалось [3], что с уменьшением высоты и продвижением вод от областей питания в сторону озер увеличивается соленость и щелочность. Соответственно в этом же направлении увеличиваются значения  $\delta^{18}$ О и  $\delta$ D (рис. 2,  $\epsilon$ , $\epsilon$ ).

Изотопный состав углерода гидрокарбонат-иона указывает на генезис углерода, особенно это актуально для широко распространенных здесь содовых вод. Источник может быть атмосферный ( $\sim$  от -11 до -5 ‰), биогенный ( $\sim$  от -30 до -12 ‰), в результате разложения карбонатных пород ( $\sim$  от -2 до 2 ‰), мантийный и магматический ( $\sim$  от -4 до -8 ‰)². Тяжелым  $\delta^{13}$ С выделяются озерные воды территории – от -7.6 до 2.1 ‰, что указывает на основной вклад атмосферной  $CO_2$ . Данные подтверждают полученную ранее информацию по изотопному составу углерода соседних озер [3] и близость их состава к морским водам [6, 7]. В то время как гидрокарбонат-ион рек легче (-13.2 ‰) и характерен для пресноводных водоемов [8, 9], значения  $\delta^{13}$ С(HCO<sub>3</sub>) подземных вод варьируются в интервале от -13.8 до

-

 $<sup>^2</sup>$  Интервалы значений  $\delta^{13}$ С варьируются у разных исследователей, здесь приведены наиболее встречаемые по мнению авторов

-8.5 ‰, что указывает на биогенный источник, но с некоторым утяжелением из-за еще имеющегося влияния атмосферного  $CO_2$  (воды неглубокие). а возможно и озерных вод. Разные по химическому составу два типа вод по  $\delta^{13}$ С идентичны. В общей эволюции с увеличением концентрации иона  $HCO_3^-$  увеличивается величина  $\delta^{13}$ С, т.е. утяжеляется изотопный состав углерода (рис. 2,  $\delta$ ).

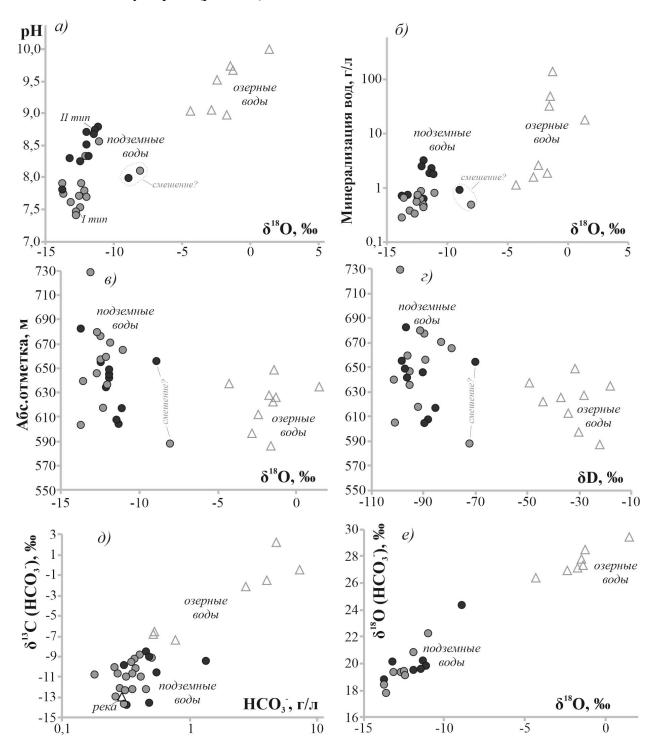


Рис. 2. Некоторые зависимости изотопного состава воды района Торейских озер от показателей: *а*)  $\delta^{18}$ О от рН вод, *б*) от солености, *в*) от гипсометрического положения водных объектов, *г*)  $\delta$ D от гипсометрического положения водных объектов; *д*)  $\delta^{13}$ С (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) от содержания HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и *е*)  $\delta^{18}$ О (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) от  $\delta^{18}$ О в воде.

Гидрокарбонат-ион всех природных вод района обогащен  $^{18}$ О в среднем на 20-30 %: для подземных вод в интервале от 17.8 до 24.3 % (чуть тяжелее для II типа), для озер – от 26.3 до 29.3 %. Очевидно, что при его формировании происходит фракционирование кислорода с переходом тяжелого изотопа в карбонатные ионы, а затем и во вторичные карбонаты. При этом, как видно из рисунка 2, e, наследуется изотопный состав воды.

Изотопные определения сульфатных форм серы позволяют оценить различные биогеохимические процессы, происходящие в водах. Более широкие вариации  $\delta^{34}S$  сульфатов (от 3.3 до 17.5 %) в озерах и в среднем большее обогащение тяжелым изотопом <sup>34</sup>S указывают на наличие бактериальной редукции сульфата, которая в континентальных водоемах сопровождается существенным разделением изотопов серы крайних членов цепи ее превращения. Для подземных вод характерны достаточно однородные (от 5.8 до 8.8 %) и легкие значения  $\delta^{34}S$ , что указывает на отсутствие сульфатредукции.

## Заключение

По изотопным данным подземные воды верхней динамической зоны (до 70 м) района Торейских озер имеют метеорный генезис, однако в некоторых случаях смешиваются с более «тяжелой» (из-за испарительных процессов) озерной водой. Отмечается высотная изотопная зональность. В целом, при движении вод от областей питания в сторону озер утяжеляются значения  $\delta^{18}$ О,  $\delta$ D,  $\delta^{13}$ С параллельно с ростом солености и рН. Источник углерода в большей части легкий биогенный с небольшой долей утяжеленного поверхностного (атмосферного). При формировании НСО<sub>3</sub>-иона происходит фракционирование кислорода с переходом тяжелого изотопа в карбонатные ионы, а затем и во вторичные карбонаты. Величина  $\delta^{34}$ S для подземных вод указывает лишь на отсутствие процесса сульфатредукции. Несмотря на различия двух типов вод по химическому составу, по изотопному они оказались идентичными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-35-90040.

#### Список литературы

- 1. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: A case study from south-eastern Transbaikal region (Russia) // Appl. Geochemistry. 2020. V. 123.
- 2. Борзенко С.В. и др. Содовые воды района Торейских озер Забайкальского края: химический состав подземных и озерных вод // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы III Всероссийской науч. конф. с международным участием. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН. 2018. С. 434–437.
- 3. Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // Appl. Geochemistry. 2019. V. 103, P. 72–84.
- 4. Borzenko S.V. Isotopic Composition of Waters in Salt Lakes of Eastern Transbaikal // Dokl. Earth Sci. 2019. V. 488, № 1. P. 1089–1093.
  - 5. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М: Научный мир, 2009. 632 с.
- 6. Clark I. Groundwater geochemistry and isotopes // Groundwater Geochemistry and Isotopes. Boca Raton: CRC Press. Taylor & Francis Group, 2015. 456 p.
- 7. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Соотношения изотопов углерода в стратисфере и биосфере: четыре сценария // Биосфера. 2010. Т. 2, № 2. С. 231–246.
  - 8. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. М.: Недра, 1968. 226 с.
- 9. Гуцало Л.К. Формирование подземных вод и газов земной коры по изотопным данным: Автореф. д.г.-м.н.: СПб: СПбГУ, 1997. 98 с.

# КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ МЕТОДОВ С ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМ МОДЕЛИРОВАНИЕМ КАК ПУТЬ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «ВОДА – ПОРОДА»

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-189-192

Лиманцева О.А., Рыженко Б.Н.

Институт геохимии и аналитической химии им. И.В.Вернадского РАН, Москва, wri-lab@geokhi.ru

**Аннотация.** В настоящей работе проведен анализ главных недостатков широко применяемого лабораторного метода «Humidity-cell tests» и обосновано комплексирование его с физико-химическим моделированием методом проточного реактора с последующей верификацией прогноза загрязнения окружающей среды на отработанных месторождениях полезных ископаемых.

**Ключевые слова:** «Humidity-cell tests», термодинамическое моделирование, прогноз.

**Abstract.** In this paper, we analyze the main disadvantages of the widely used laboratory method "Humidity-cell tests" and justify its integration with physical and chemical modeling by the flow reactor method, followed by verification of the forecast of environmental pollution in spent mineral deposits.

**Key words:** humidity-cell tests, thermodynamic simulation, prognosis.

Взаимодействие минералов породы и воды – обычная химическая реакция, протекающая в земной коре. Разрабатывая месторождения полезных ископаемых, геохимики задумываются о мере ее окисления и формировании так называемого кислотного дренажа при извлечении руд на дневную поверхность. Данный процесс из года в год все более актуален и становится неотъемлемой процедурой экологического контроля и прогноза. В настоящее время накопилось также большое количество отработанных месторождений с Post-Mining процессами, пагубно преобразующими состав поверхностных и подземных вод, прежде всего понижая кислотность водных растворов. Рекультивационные мероприятия скорее растягивают во времени существование кислотного дренажа, нежели предотвращают его появление. Для оценки потенциального кислотного дренажа часто используется метод Humidity-cell tests (HCTs – влажностно-клеточный тест), заключающийся в пропуске потока воды через дробленую породу и химическом анализе состава образующегося раствора. Однако простое сравнение состава лабораторного раствора и состава природного водного раствора не является корректным по причине микробиологического влияния на скорости химических реакций, методика и учет которых сама по себе сложная научная задача, обесценивающая предполагаемую простоту метода НСТ. В работе [1] показано, что лабораторный метод изучения выщелачивания обладает целым спектром неконтролируемых параметров, которые, в свою очередь, влияют на химию фильтрата, это, в частности, размер частиц и объем используемого раствора, скорость окисления сульфидных минералов, «микробная активность», временной интервал лабораторных испытаний для построения долгосрочных прогнозов полевого выветривая, разница полевых и лабораторных условий по гидрогеологическим и климатическим параметрам, включая колебания температуры, а также степень изменения окисления сульфидов за счет покрытий на зернах минералов. Последнее подробно рассмотрено в работе [2]. Отмечено, что несовпадение лабораторных тестов НСТѕ с полевыми исследованиями связано прежде всего с представительностью проб, отождествляемых с литологией и минералогией объекта исследования, определяющих различные механизмы генерации кислоты. Причины понижения кислотности связаны с поверхностной пассивации, карбонатной нейтрализацией и другими минералого-геохимическими преобразованиями.

Рассматривая методику и результаты опытов по выщелачиванию химических элементов из горной породы методом НСТ, необходимо отметить «слабое место» интерпретации полученных измерений, заключающейся в применении обычных математических методов. На наш взгляд, прежде всего необходимо рассматривать лабораторную ячейку (порода+водный раствор) как физико-химическую систему известного фазового состава, складывающегося на каждый момент времени, и контролировать

соответствие между результатами опытов НСТ и результатами равновесной фазовой системы. Состав последней определяется расчетом соответствующей программой и принимается за истинный. Однако это справедливо, если приняты во внимание скорости всех реакций, потенциально возможных между компонентами системы.

Обратимся к реакциям, которые протекают в гетерогенной системе «вода – порода – газ». Как самые быстрые можно выделить гомогенные реакции ионизации – ассоциации  $(H_20=H^++OH^-)$  и реакции окисления – восстановления  $(Fe^{2+}/Fe^{3+})$  между «aqueous species». Скорости гетерогенных растворения (дегазации) газов и растворения (кристаллизации) твердых веществ существенно медленнее, чем упомянутых гомогенных ввиду наличия диффузионного этапа в механизме их реализации. Этим же объясняется температурная и барическая зависимость скоростей их реализации.

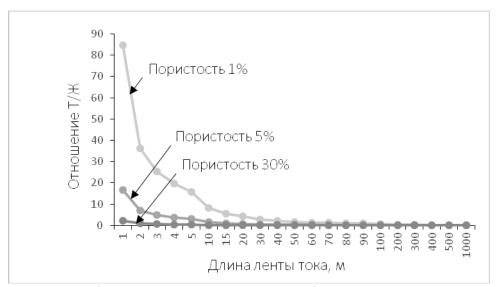
Адаптация схем физико-химического моделирования системы «вода – порода» базируется на принципе локального равновесия, учете степени протекания реакций в комплексе с методом проточного ступенчатого реактора (МПСР [3]). Соотношение масс реагирующих породы и воды (Т/Ж) в отдельной ячейке рассматривается как показатель времени контакта и химического взаимодействия [4]. Методы и приемы взаимосвязи моделируемого процесса фильтрации водного раствора через пористое пространство с физико-химических позиций вплотную приближают прогнозируемое явление к реальным условиям и позволяют учитывать динамику гидрогеохимического процесса в пространстве и времени.

Используемая нами для термодинамического моделирования программа HCh (GIBBS) (Ю.В.Шваров) [5], основанная на «методе граничных реакций», рассчитывает по заданному пользователем алгоритму результирующий химический состав раствора, а также количественный состав равновесной ассоциации твердых фаз при заданных или складывающихся значениях Eh и парциальных давлений вполне подвижных (летучих) компонентов. Основным параметром, отвечающим за имитацию движения, является Т/Ж. Отношение масс реагирующих породы и воды описывает связь между минерализацией водного раствора и характером водообмена. Сравнением состава модельного раствора и минерализации реальных вод (от горных ручьев до глубинных вод) была составлена [6] ориентировочная шкала связи между Т/Ж, минерализацией воды и водообменом (модулем стока): Т/Ж=0.001-0.010 (горные ручьи), Т/Ж=0.01-0.10 (ручьи, реки), Т/Ж=0.1-1.0 (реки, поверхностные воды), Т/Ж=1-10 (подземные воды), Т/Ж>10 (затрудненный водообмен), Т/Ж=100 (застойный водообмен) [7].

Связь параметра Т/Ж с динамикой движения воды через валовый химический состав жидкой фазы системы «вода — порода» основана на решении обратной задачи, т.е. из заданного диапазона значений Т/Ж выбирается то, которое соответствует максимальному совпадению расчетной минерализации раствора с минерализацией моделируемого объекта.

Связь параметра Т/Ж с динамикой движения воды также возможна через пористость среды фильтрации. Зная скорость фильтрации подземных вод, отношение Т/Ж можно скорректировать с позиции интенсивности водообмена. Принимая за ячейку моделирования блок породы весом 100 кг с объемной плотностью 2.5 г/см³ и пористостью 1 %, получаем куб с ребром 34.31 см. Тогда для составления ленты тока протяженностью 10 м потребуется 29.14 блоков. Переходя к скорости фильтрации, получаем количество воды, заполняющее 10 м объемной ленты тока. Таким образом, отношение Т/Ж, соответствующее относительной скорости фильтрации 10 м в единицу времени, получается путем деления массы блока породы (в нашем случае 100 кг) на массу водного раствора, равную произведению порции воды, заключенной в расчетном блоке породы, на количество блоков, составляющих 10 м ленты тока. Здесь нужно оговориться, что плотность водного раствора принимается 1 г/см³. Отсюда значение Т/Ж будет равным 8.21. Такой алгоритм подбора модельного параметра Т/Ж позволяет количественно описать скорость водообмена в рамках термодинамической модели, учитывая реальную пористость образца породы (рисунок). Гидродинамическая зональность выделяет три основные зоны по интенсивности и условиям водообмена

(коэффициент водообмена): интенсивного (0.01-1), замедленного  $(0.01-1\cdot10^{-9})$  и весьма замедленного (затрудненного) водообмена. Зона интенсивного водообмена характеризуется действительными скоростями движения подземных вод от сотен метров до 1 м в год. В остальных зонах водообмен осуществляется от 100 до миллионов лет. Для таких условий скорости потока сравнимы со скоростями химических реакций, что отвечает условиям термодинамического равновесия и сводит неучет скорости фильтрации в модели к минимуму. Согласно выполненной схематизации через блок породы массой 100 кг плотностью  $2.5 \text{ г/см}^3$ , являющийся единичным элементом ленты тока, получаются следующие коэффициенты водообмена (таблица).



Зависимость значений T/Ж от относительной скорости фильтрации через породу плотностью  $2.5 \text{ г/см}^3$ .

Коэффициенты водообмена, соответствующие ленте тока определенной длины

Зона водообмена		акти	вного		замедленного					
лента тока, м	1	10	30	50	100	300	1000	10000	100000	
коэффициент водообмена	0.2	0.03	0.01	0.007	0.003	0.001	0.0003	0.00003	0.000003	

Такой подход позволяет пористое пространство разбить на поры-трубочки диаметром, соответствующим среднему размеру пор породы. Тогда в первом приближении появляется возможность рассчитать площадь поверхности порового пространства и применить формулы скорости растворения минералов породы, получив тем самым мольное количество элементов, перешедших в водный раствор. Таким образом, зная время контакта (время существования системы «вода — порода») и скорость фильтрации, можно определить модельный параметр T/Ж, максимально приближая к реальным условиям процесс моделирования фильтрации через колонну породы. Корректировка кинетической составляющей проводится посредством сопоставления количества растворившегося минерала по термодинамической программе (HCh) и по уравнению скорости растворения ( $x_i$ = $Fs_i$ - $S_i$ 

Таким образом, становится очевидным повышение точности прогноза методом НСТ, широко используемым в экологических прогнозах на разрабатываемых месторождениях полезных ископаемых, через увязку промывочной колонны (ячейки), заполненной породой, с моделью проточного многоступенчатого реактора, позволяющей «улавливать» промежуточные формы растворения и осаждения минералов в многокомпонентной системе

«порода – вода», поведение которых определяется фундаментальными законами физической химии.

# Список литературы

- 1. Nordstrom D. Kirk, Maest Ann Why predictions fail // Symposium Mines and the Environment, Rouyn-Noranda, 2015. P. 1–18.
- 2. Davis Andy, Whitehead C., Lengke M., Collord J. Acid-Base Accounting Tests in Combination with Humidity Cells Help to Predict Waste Rock Behavior // Mine Water and the Environment. 2019. 38. 467–487 https://doi.org/10.1007/s10230-019-00617-1.
- 3. Гричук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Научный мир, 2000. 230 с.
- 4. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.
- 5. Шваров Ю.В. Алгоритмизация численного равновесного моделирования динамических геохимических процессов // Геохимия. 1999. № 6. С. 646–652.
- 6. Рыженко Б.Н., Крайнов С.Р. О влиянии соотношения реагирующих масс породы и воды на формирование химического состава природных водных растворов в системах открытых по  $CO_2$  // Геохимия. 2000. 9. С. 803-815.
- 7. Limantseva O.A., Ryzhenko B.N. Geochemical Assessment of the Ecological State of the Territory of a Cu-Ore Deposit by Thermodynamic Modeling of the Water-Rock-Gas System // Geochemistry International. 2020. V. 58, N 13. P. 1437–1442.
- 8. Алексеев В.А. Кинетика и механизмы взаимодействия водных растворов с породообразующими минералами // Фундаментальные проблемы современной гидрогеохимии / Ред. С.Л. Шварцев. Томск: Изд-во научно-технической литературы, 2004. С. 27–35.
- 9. Новоселов А.А., Мироненко М.В. Взаимодействие гранита с водой при различных температурах. Результаты кинетико-термодинамического моделирования/Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН» 2009. №1(27).

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТУМНИН И АННЕНСКОЕ (СИХОТЭ-АЛИНЬ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-193-197

Лысенко А.И.<sup>1</sup>, Брагин И.В.<sup>2</sup>, Челноков Г.А.<sup>3</sup>, Харитонова Н.А.<sup>4</sup>

1,2 Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, lion8888@inbox.ru; bragin ivan@mail.ru

 $^3$ Геологический институт РАН, Москва, geowater@mail.ru

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, tchenat@mail.ru

Аннотация: В работе был изучен процесс взаимодействия метеорных вод с вмещающими оруденение горными породами месторождений Тумнин и Анненское, их одноименными термальными источниками и грунтовыми водами. Исследование проводилось методом физико-химического моделирования с помощью программного комплекса «Селектор» по степени протекания реакции. Определены параметры рН растворов, их минерализация и химический состав термальных вод и кристаллизующиеся из них минералы. Проведено сравнение химических составов модельных растворов и их показателей с природными водами.

**Ключевые слова:** термальные воды, физико-химическое моделирование, взаимодействие вода – порода.

**Abstract:** In the work, the process of interaction of meteoric waters with the host rocks of the Tumnin and Annenskoe deposits, their thermal springs and ground waters of the same name was studied. The study was carried out by the method of physical and chemical modeling using the "Selector" software package according to the degree of the reaction. The pH parameters of the solutions, their mineralization and the chemical composition of thermal waters and the minerals crystallizing from them were determined. The comparison of the chemical compositions of model solutions and their indicators with natural waters is carried out.

Key words: thermal waters, physical and chemical modeling, water-rock interaction.

#### Введение

Термальные воды являются сложными многофазными системами, содержащими различные количества химических веществ как результат взаимодействия системы «вода – порода – газ – органическое вещество». На данный момент важным вопросом в геохимии остаются процессы их формирования. Не стали исключением и низкотемпературные азотные месторождения термальных источников Хабаровского края – Тумнин и Анненское – Сихотэ-Алинской складчатой области. Они активно используются населением в бальнеологических целях, что вызывает особый интерес для их изучения [1–4].

Целью данной работы является моделирование взаимодействия метеорной воды с горными породами месторождений термальных источников Тумнин и Анненское и грунтовыми водами, сравнение результатов полученных составов моделируемых систем, а также показателей растворов с результатами химических анализов гидротермальных вод одноименных месторождений.

Тумнинские термальные воды расположены в долине р. Чопэ, в 9 км от железнодорожной станции Тумнин (Ванинский район). Анненские термы находятся на правом берегу нижнего течения р. Амур, в 120 км вверх по течению от г. Николаевска-на-Амуре (рис. 1). Тумнинские термальные воды выходят на поверхность в зоне контакта гранитов и андезитобазальтов Кизинской свиты неогена, Анненские термы разгружаются в пределах зоны контакта эффузивов и терригенных осадочных пород верхнего мела Больбинской и Татаринской свит [5].

# Методы исследования

Пробоотбор горных пород и гидротермальных вод месторождений Тумнин и Анненское проводился в 2019 г., на месте были определены параметры рН и температура терм. Анализы отобранного материала выполнены в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток). Химический состав горных пород был определен методами гравиметрии, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) на спектрометре iCAP 6500Duo, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на спектрометре Agilent 7700. Определение концентраций

элементов в образцах гидротермальных вод выполнялось методами АЭС-ИСП и ИСП-МС, а также жидкостной ионной хроматографией (HPLC-10 Avp, SHIMADZU).

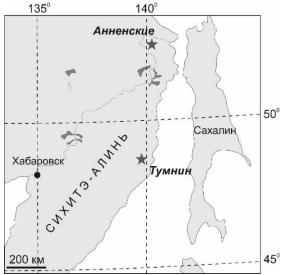


Рис. 1. Схема расположения месторождений термальных источников Тумнин и Анненское [7].

Физико-химическое моделирование взаимодействия метеорной воды с горными породами месторождений термальных источников Тумнин и Анненское и грунтовыми водами осуществлялось с помощью программы «Селектор», (разработчики И.К. Карпов и др., Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН). В ее основе лежит подход выпуклого программирования с целью расчета равновесий в гетерогенных системах методом минимизации энергии Гиббса [6]. Термодинамические свойства веществ рассчитываются с учетом температуры, давления и коэффициентов активности компонентов, которые вычисляются по уравнению Дебая-Хюккеля в модификации Хельгесона [8]. Изотермические изменения термодинамических функций вычисляются с помощью уравнения зависимости изменения объема конденсированных фаз, в зависимости от температуры и давления, с использованием полуэмпирических уравнений состояния газов в приведенных параметрах. При расчете моделей были использованы термодинамические параметры жидкой, газовой и твердой фаз потенциально возможно образующихся веществ [9], заложенных в базах данных программы, таких как: sprons98, sprons97, Yokokawa и др. Химический состав атмосферы рассчитывался на основе работы Р. Хорна [10]: Ar-3.2, C-0.10, N-539.48, O-144.85.

Краткую схему модели формирования термальных вод Сихотэ-Алиня можно представить следующим образом (рис. 2). Метеорные воды, взаимодействуя с горными породами, опускаются в толщу земной коры, поглощая ее тепло, достигают геотермального резервуара (глубина около 3 км), где нагреваются до максимальных температур (86–95 °C). Далее, в соответствии с законами конвекции, они циркулируют к местам разгрузки, охлаждаясь в результате теплообмена с горными породами и разбавления более холодными грунтовыми водами. Температуры в резервуарах были взяты в соответствии со средним геотермическим градиентом, который составляет 30 °C на 1 км глубины, а давление учитывалось исходя из расчета его увеличения с глубиной в среднем на 100 атм/км.

Физико-химические модели формирования термальных вод состоят из 12 резервуаров. Метеорные воды (T=7 °C, P=1 атм.) опускаются на глубину в каждом последующем резервуаре (№ 1–4) с постадийным увеличением температуры и давления, максимальное значение которых достигается в глубинном резервуаре № 5 (Тумнин: T=86 °C, P=300 атм; Анненское: T=99 °C, P=300 атм.). Резервуар № 7 описывает состав холодных грунтовых вод (T=7 °C, P=1 атм.), которые, взаимодействуя с горными породами (№ 8, 9), перемешиваются с термальными водами в резервуаре № 10 и охлаждаются до T=75 °C при P=150 атм. Далее

они поднимаются к поверхности, где достигают соответствующих температур и давлений (Тумнин: T=45 °C, P=1 атм., Анненское: T=50 °C, P=1 атм.) в резервуаре № 12.

Так же были взяты во внимание степени протекания реакции, учитывающей количество горной породы, вступившей во взаимодействие с термальной водой. В процессе моделирования было установлено, что оптимальные значения рH и TDS достигаются при следующих степенях протекания процесса: Тумнин -3.0, Анненское -2.8.

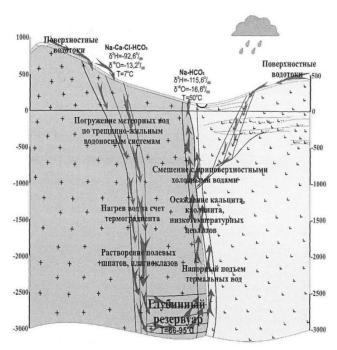


Рис. 2. Концептуальная модель формирования термальных вод Сихотэ-Алиня [9].

Независимые компоненты модели, являющиеся химическим составом моделируемых систем, представлены следующими элементами: C-Ca-F-Fe-K-Al-Mg-Cl-N-Na-P-S-Si-H-O-e (где e- электрон). Зависимые компоненты включают в себя список фаз, существование которых возможно в равновесном состоянии, и составляют: 118 зависимых компонентов водного раствора и  $H_2O$  как растворитель, 14 газов, 186 твердых фаз. Общее число зависимых компонентов системы - 317.

При формировании моделей для каждого месторождения использовались химические составы двух типов пород, полученные на основании данных проанализированных проб. Предполагалось, что термальные воды поступают в глубинный резервуар, взаимодействуя с одним типом пород (1), а поднимаются к зоне разгрузки контактируя с другим (2). Для месторождения Тумнин: 1) диорит:  $SiO_2 - 56.54$ ,  $Al_2O_3 - 16.74$ ,  $Fe_2O_3 - 9.10$ , MgO - 4.23, CaO - 5.96,  $Na_2O - 3.31$ ,  $K_2O - 1.61$ ,  $P_2O_5 - 0.33$ ,  $H_2O - 0.46$ ;  $CO_2 - 0.56$  (мас. %); 2) базальт:  $SiO_2 - 49.61$ ,  $Al_2O_3 - 16.61$ ,  $Fe_2O_3 - 13.39$ , MgO - 4.86, CaO - 6.26,  $Na_2O - 3.22$ ,  $K_2O - 1.55$ ,  $P_2O_5 - 0.56$ ,  $H_2O - 0.46$ ;  $CO_2 - 1.51$  (мас. %);

Для месторождения Анненское: 1) гранит:  $SiO_2 - 68.75$ ,  $Al_2O_3 - 14.39$ ,  $Fe_2O_3 - 4.86$ , MgO - 1.10, CaO - 0.84,  $Na_2O - 4.01$ ,  $K_2O - 2.74$ ,  $P_2O_5 - 0.11$ ,  $H_2O - 0.46$ ;  $CO_2 - 1.94$  (мас. %); 2) базальт:  $SiO_2 - 48.95$ ,  $Al_2O_3 - 15.76$ ,  $Fe_2O_3 - 10.55$ , MgO - 4.21, CaO - 5.19,  $Na_2O - 2.79$ ,  $K_2O - 2.84$ ,  $P_2O_5 - 0.41$ ,  $H_2O - 0.46$ ;  $CO_2 - 7.32$  (мас. %).

Дополнительно в систему были введены F, Cl, S, которые установлены в составах гидротерм и необходимы для кристаллизации минералов в рассматриваемых условиях. В связи с отсутствием возможности определения содержания данных элементов в отобранных образцах горных пород они были введены в последний резервуар системы в количествах, определенных в составах термальных источников исследуемых месторождений (мг/л): Тумнин:  $F^- - 0.22$ ,  $Cl^- - 2.10$ ,  $SO_4^{2-} - 10.2$ ; Анненское:  $F^- - 2.85$ ,  $Cl^- - 4.82$ ,  $SO_4^{2-} - 33.5$ .

Моделирование проводилось при соотношении 100 г породы к 1 кг воды.

# Результаты и обсуждение

В результате физико-химического моделирования установлено, что показатели кислотности — щелочности модельных и природных гидротермальных растворов близки для месторождения Тумнин и составляют 9.3 и 8.0, соответственно (таблице). Для Анненских терм отклонение величины параметра рН составляет 1.6, что ниже измеренного на объекте исследования. Показатели минерализации (TDS) модельных растворов имеют более высокие значения по сравнению с реальными. Превышения составляют немного меньше 100 мг/л для месторождения Тумнин и 130 мг/л для Анненского.

Содержание следующих элементов — Na, K, Mg, F, Cl, S, и Si — в модельных растворах месторождения Тумнин хорошо верифицируются с природными значениями. Концентрация

Сравнение результатов моделирования с реальными растворами

Показатель	Реальный	Модельный	Реальный	Модельный		
	раствор	раствор	раствор	раствор		
раствора	термального	термального	термального	термального		
раствора	источника	источника	источника	источника		
	Тумнин	Тумнин	Анненское	Анненское		
pН	9.3	8	9.2	7.6		
TDS, мг/л	195	286	300	425		
	Соде	ржания элементов	в, мг∕л			
Na	3.34+01	1.04+01	5.74+01	1.57+01		
K	4.41-01	3.15-01	1.18+00	3.57-01		
Ca	1.82+00	1.46+01	1.99+00	4.56+00		
Mg	1.00-01	1.57-01	1.00-01	4.35-01		
F	2.20-01	7.25-01	2.85+00	1.42+00		
Cl	2.10+00	1.05+00	4.82+00	2.41+00		
S	3.40+00	1.70+00	1.12+01	1.23+01		
Si	3.43+01	5.19+01	4.12+01	1.12+02		
Fe	1.65-02	3.75+01	2.61-01	2.27+01		
Al	1.28-02	2.95-03	1.23-02	4.45-04		

Fe и Ca в моделируемом растворе выше в десять раз, чем в природных водах, что, возможно, связано с их низкой растворимостью. Небольшое отклонение (0.007) в меньшую сторону наблюдается для Al. При этом из растворов моделируемых систем кристаллизуются несколько Al-содержащих минералов со следующими массами (мг): пирофиллит  $Al_2Si_4O_{10}(OH)_2-1.33$ , микроклин  $K(AlSi_3)O_8-5.17$ , хлорит  $Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8-11.99$  а также образуется Ca-содержащий фторапатит  $Ca_5(PO_4)_3F-133$  мг.

Похожая ситуация с содержанием Fe наблюдается в моделируемых растворах месторождения Анненское. Концентрации Na, Ca, Mg, S моделируемых и реальных растворов близки. Содержание Si в моделируемых растворах в десять раз выше, а K и Al в 100 раз ниже, чем в природных образцах вод, что позволяет предположить существование дополнительного источника поступления их в гидротермальные воды. Из растворов выпадают следующие минералы (мг): каолинит  $Al_2Si_2O_5(OH)_4-4.02$ , и Ca-содержащий фторапатит -0.19.

Все минералы, формирующиеся из растворов моделируемых систем гидротермальных месторождений Тумнин и Анненское, действительно могут существовать в описываемых условиях, что подтверждается литературными данными [11].

# Выводы

Анализ результатов проведенного физико-химического моделирования показал, что полученные растворы термальных вод месторождения Тумнин наиболее близки к природным водам, о чем свидетельствует совпадение концентрации Na, K, Mg, F, Cl, S, и Si в растворах, показатели величины параметра рН и минерализации. Отклонения содержания К

и А1 в термальных водах месторождения Анненское можно объяснить их возможным поступлением из других горных пород. Вероятно, недостаточное количество К и А1 не позволяет образоваться некоторым твердым фазам, в составе которых присутствует Si, что объясняет его значительное превышение. Установленный минеральный состав моделируемых систем подтверждает правильность полученных результатов. Также есть предположение, что температуры в моделируемых резервуарах значительно выше реально существующих, что вносит в модель смещение по произведению растворимости вторично образуемых минеральных фаз.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77- 10007).

# Список литературы

- 1. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Chudaeva V.A. Low-temperature geothermal waters of continental margin of Far East of Russia // Proceedings of the 12th international symposium on water-rock interaction WRI. 2007.12. P. 481–484.
- 2. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Chudaev O.V., Kharitonova N.A., Vysotskiy S.V. Geochemistry of thermal waters of continental margin of Far East of Russia // Acta geologica sinica. 2016. 90 (1) P. 276–284.
- 3. Bragin I.V., Chelnokov G.A., Kharitonova N.A. Thermomineral springs of North-Eastern Sikhote-Alin' Ridge, Far East of Russia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. 227. 052042.
- 4. Chudaev O.V., Chudaeva V.A., Bragin I.V. Geochemistry of thermal waters of Sikhote–Alin // Russian Journal of Pacific Geology. 2008. 27 (6). P. 73–81.
- 5. Брагин И.В., Челноков Г.А. Геохимия термальных вод Сихотэ-Алиня. Газовый аспект // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 147–151 .
- 6. Чудненко К.В., Карпов И.К. Селектор Windows Программное средство расчета химических равновесий минимизацией термодинамических потенциалов. Краткая инструкция. Иркутск, 2003. 90 с.
- 7. Зиппа Е.В., Брагин И.В. Оценка температуры азотных термальных вод на глубине циркуляции, Сихотэ-Алинь // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: сборник материалов IV Всероссийской научной конференции с международным участием. Улан-Удэ: Геологический институт СО РАН, 2020. С. 61–64.
- 8. Helgeson H.C., Kirkham D.H., Flowers G.C. Theoretical prediction of the thermodynamic behavior of aqueous electrolytes at high pressures and temperatures. IV. Calculation of activity coefficients, osmotic coefficients, and apparent molal and standard and relative partial molal properties to 600 °C and 5 Kb // Amer. J. Sci. 1981.Vol. 281. P. 1249–1516.
- 9. Брагин И.В. Термальные воды Сихотэ-Алиня (состав и условия формирования): Дис. ... канд. геол.мин. наук. Томск, 2011.
- 10. HorneR. A Marine chemistry. NY—London—Sydney—Toronto: Wiley—Interscience, A Division of John Wiley & Sons, 1969. 568 p.
  - 11. Бетехтин А.Г. Курс минералогии: Учебное пособие. М.: КДУ, 2007. 720 с.

# ГЕНЕЗИС И ЭВОЛЮЦИЯ НИЗКОЭНТАЛЬПИЙНЫХ АЗОТНЫХ ТЕРМ В ГРАНИТНЫХ МАССИВАХ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КУЛЬДУР

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-198-202

Лямина Л.А. $^{1,2}$ , Харитонова Н.А. $^{2,3}$ , Расторгуев А.В. $^2$ , Челноков Г.А. $^1$ , Брагин И.В. $^3$   $^1$  Геологический институт РАН, Москва, lyamina-96@list.ru  $^2$  Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, tchenat@mail.ru  $^3$  Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, bragin ivan@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлены результаты изотопно-геохимических и гидродинамических исследований термальных вод месторождения Кульдур, которые позволяют выявить основные механизмы формирования низкоминерализованных азотных термальных вод в кристаллических массивах. Изученные термы являются пресными (минерализация не превышает 0.4~г/л), щелочными (рН варьируется в диапазоне 7.98-9.01) и принадлежат  $HCO_3$ -Nа типу с повышенными концентрациями  $SiO_2$ , F, Al, W, Mo. Установлено, что основной компонент газового состава представлен атмогенным азотом ( $N_2$ ), водная фаза имеет метеогенную природу. На основе полученных фактических данных создана гидрогеологическая модель фильтрации и тепломассопереноса подземного флюида, отражающая характер формирования и циркуляции термальных вод данного месторождения.

**Ключевые слова:** азотные термальные воды, изотопы, месторождение Кульдур, геотермометры, гидрогеологическая модель.

Abstract. This paper presents the results of isotope-geochemical and hydrodynamic studies of the thermal waters of the Kuldur Spa, which allow us to identify the main mechanisms of formation of low-mineralized nitrogen thermal waters in crystalline massifs. The studied thermae are soft (mineralization does not exceed 0.4 g/l), alkaline (pH varies in the range of 7.98 - 9.01) and belong to the HCO<sub>3</sub>-Na type with increased concentrations of SiO<sub>2</sub>, F, Al, W, Mo. It was found that the main component of the gas composition is atmogenic N<sub>2</sub>, the water component has a meteogenic genesis. Based on the obtained actual data, a hydrogeological model of filtration and heat and mass transfer of underground fluid was created, reflecting the nature of the formation and circulation of thermal waters of this field.

Key words: nitrogen thermal waters, isotopes, Kuldur Spa, geothermometry, hydrogeological model.

# Введение

Азотные термальные воды представляют собой одну из самых крупных групп минеральных вод. На территории России выделено шесть областей развития азотных терм: Кавказская, Алтайская, Буреино-Охотская, Тувинская, Саяно-Байкальская и Камчатская [1]. На данном этапе развития гидрогеохимии весьма актуальны вопросы выявления факторов, процессов и обстановок, определяющих состав терм, их низкую минерализацию, повышенные концентрации фтора, кремнекислоты и ряда микрокомпонентов, реакции взаимодействия терм с водовмещающими породами, а также характера циркуляции в кристаллических массивах в глубоких горизонтах, и оценки влияния фильтрационных параметров и тепломассопереноса на движение флюида от зоны питания к зоне разгрузки. Ряд особых вопросов при исследовании терм касается генезиса, свойств и времени пребывания термальных вод в системе «вода – порода», а также глубины формирования и зоны питания.

Данное иследование направлено на всестороннюю геохимическую и гидрогеологическую оценку геотермальных вод месторождения Кульдур (Буреино-Охотская область). Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования химического, изотопного и газового состава азотных термальных вод этого месторождения, а также построение двухмерной численной модели фильтрации и тепломассопереноса флюида из глубоких горизонтов земной коры к поверхности по вертикальному разрывному нарушению.

Для построения надежной концептуальной модели фильтрации вод месторождения был проведен трехлетний мониторинг — исследовались пробы на химический, изотопный и газовый состав; выявлялись корреляционные связи между различными химическими компонентами для исследования особенностей состава, возникающих в сложной геологической обстановке.

### Объект исследования

Объектом настоящего исследования является Кульдурское месторождение азотных слабоминерализованных щелочных термальных вод, располагающееся во внутриконтинентальной части Дальнего Востока, в одноименном поселке. Географические координаты Кульдурского месторождения — 49°15' с.ш. и 131°31' в.д.

Территория исследования находится в южной части Мало-Хинганского блока Буреинского массива. По данным геологических исследований центральную часть района занимает Пионерский гранитный массив палеозойского возраста ( $\gamma \delta_2 C_{2-3}t$ ), относящийся ко второй фазе тырмо-буреинского комплекса. Гранитный массив тектонически раздроблен и имеет сильно развитую сеть аплито-пегматитовых жил [2, 3].

На месторождении с 1987 г. функционируют две эксплуатационные скважины 1–87 и 2-87, расположенные непосредственно в водоподводящей зоне разлома и имеющие самые высокие температуры (71–72 °C), а также наибольший дебит (9.67 л/с), что позволяет выделить эту часть термального поля как центральную зону. Вода из этих скважин используется как для лечения пациентов, так и для теплофикации помещений санатория. Скважины 3-87, 3-51 и 5-51 используются для режимных наблюдений, водоотбор из них не производится. Скважины 3-87 и 5-51 удалены от эксплуатационных скважин на 20–25 м и также находятся в водоподводящей зоне разлома, но температура воды (50–60 °C) существенно ниже. В скважине 5-51, находящейся на фланге, температура воды составляет 20–25 °C.

#### Методы исследования

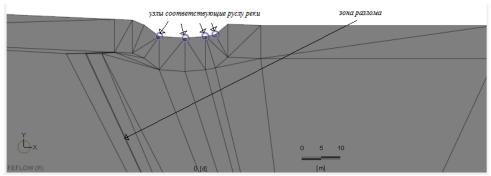
В ходе проведения полевых работ были отобраны пробы из термальных скважин, р. Кульдур и атмосферных осадков в течение полевых сезонов 2018, 2019 и 2020 гг. На месте отбора проб были произведены измерения нестабильных параметров (рН, Еh, температура, электропроводимость, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (CO<sub>3</sub><sup>2</sup>-)). Химический анализ воды на макро- и микрокомпоненты был выполнен методами ионной хроматографии и ICP-MS (Agilent 7700). Изотопный анализ <sup>18</sup>О и <sup>2</sup>Н воды определялся на массспектрометре Thermo Finnigan MAT 253 (Германия, Бремен). Радиоуглеродное датирование водных проб проведено из гидрокарбоната, высаженного непосредственно на месте отбора. Графитизация образцов проводилась в Институте географии РАН, а непосредственные измерения значения <sup>14</sup>С выполнены в Центре изотопных исследований Университета Джорджии (США).

Состав свободного газа определен на хроматографе Кристалл 5000.2. в ГИН РАН. Значение  $\delta^{13}C_{\text{газ}}$  в СО<sub>2</sub> и СН<sub>4</sub> получено с помощью комплекса оборудования Delta V Advantage фирмы Thermo Finnigan (Бельгия). Определение  $\delta^{15}N_{\text{газ}}$  выполнялось в Центре изотопных исследования ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) на масс-спектрометрическом комплексе. Анализ изотопных соотношений  ${}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He}$ ,  ${}^{4}\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}/{}^{22}\text{Ne}$ ,  ${}^{38}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ ,  ${}^{84}\text{Kr}$ ,  ${}^{132}\text{Xe}$  производился в геологической службе Японии, в Национальном институте передовых промышленных наук и технологий.

Численное решение задачи было выполнено на основе программного кода Feflow [4], в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Неортогональная разбивка сетки позволяет более подробно рассмотреть зону разрывного нарушения, русло р. Кульдур, являющегося дренажом для термальных вод. На рисунке приведена дискретизация расчетного разреза на 1846 элементов с 1001 узлами.

# Химический состав термальных вод

Азотные кремнистые термальные воды месторождения Кульдур являются горячими ( $T=72-73~^{\circ}C$ ) в центральной зоне, переходя в субтермальные с температурой  $\sim 20~^{\circ}C$  в периферийной зоне. Термальная вода бесцветная, голубоватая, совершенно прозрачная. Термы имеют исключительно низкую минерализацию порядка 0.3-0.4~г/л, рH = 7.82 до 9.09, по химическому составу воды HCO3-Na. Определяющих отличий в макрокомпонентном составе трех температурных зон не выявлено.



Подробная дискретизация вблизи реки и разрывного нарушения.

Среди катионов наибольшую концентрацию имеет  $Na^+$ , содержание которого колеблется в диапазоне 83.6–94.3 мг/л, затем следуют  $K^+$  и  $Ca^{2+}$ : содержание  $K^+$  варьируется от 1.88 до 4.17 мг/л, а  $Ca^{2+}$  – 1.68–2.11 мг/л. В термальных водах содержание катиона  $Mg^{2+}$  ничтожно (максимальное значение 0.17 мг/л). Содержание  $HCO_3^-$  достаточно высокое (до 152.6 мг/л), концентрация  $Cl^-$  находится в диапазоне значений 22.2–32.0 мг/л,  $SO_4^{2-}$  11.2–19.3 мг/л. В повышенных концентрациях фиксируются такие элементы, как  $F^-$  (до 20.6 мг/л),  $H_2SiO_3$  (более100 мг/л), Al (до 10 мг/л и более), вольфрам, молибден и ряд других анионогенных элементов [2].

# Изотопный состав

Изотопы  $\delta^{18}$ О и  $\delta^{2}$ Н близко ложатся к линии метеорных вод Крейга ( $\delta^{2}$ Н=8  $\delta^{18}$ О+10, 1961 г.), указывая на то, что исследуемые воды имеют метеорное происхождение. Значения  $\delta^{18}$ О и  $\delta^{2}$ Н для терм из скважин 1-87 и 2-87 находятся в диапазоне от -13.8 до -14.5 ‰ и от -102.3 до -105.1 ‰; для скважин 3-87 и 3-51 значения  $\delta^{18}$ О и  $\delta^{2}$ Н от -13.2 до -14.6 ‰ и от -100.6 до -109.3 ‰, а для скважины 5-51 соответственно -14.5 ‰ и -101 ‰. Для реки значения варьируются в незначительном диапозоне от -13 до -13.3‰ и от -95.5 до -95.7 ‰; для атмосферных осадков -12 ‰ и -89.5 ‰ соответственно [2].

Установлено, что основным компонентом как растворенных, так и спонтанных газов является азот, содержание которого достигает 97.4 об.%, примерно 2 % приходится на инертные газы (Ar=1.8 %, He=0.2 %), а остальные 0.6 % – это совместно  $CO_2$  и  $CH_4$ . По изотопному составу  $\delta^{15}N$  можно говорить об атмосферном происхождении азота. Величина  $\delta^{13}C$  в  $CO_2$  Кульдура составляет –25.6 ‰, что позволяет говорить об органическом генезисе углекислого газа.

Для выявления мантийной составляющей в термальных водах месторождения Кульдур были использовано отношение изотопов  ${}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He}$  и  ${}^{4}\text{He}/{}^{20}\text{Ne}$  в растворенных газах. Значения отношения  ${}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He}$  повышены относительно корового отношения  ${}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He}$  ( $2\times10^{-8}$ ):  $4.12\times10^{-7}$  для центральной зоны и  $2.86\times10^{-7}$  для промежуточной зоны. По системе уравнений Sano и Wakita [5] были рассчитаны пропорции соотношения атмосферного, корового и мантийного гелия: в центральной зоне  ${}^{4}\text{He}$  составляет 90 %, а в промежуточной  $\sim$ 95 %. Содержание мантийного гелия  ${}^{4}\text{He}$  побыше на  ${}^{4}\text{He}$  обеих зонах составляет  ${}^{2}\text{He}$  , а атмосферного гелия  ${}^{4}\text{He}$  в центральной зоне больше на  ${}^{4}\text{He}$  %, чем в промежуточной.

# «Возраст» термальных вод

По литературным данным на основе He/Ar соотношения возраст Кульдурских терм был оценен в 2.625 млн лет [6]. В настоящей работе была предпринята попытка дать более точные данные о времени нахождения воды в геологической системе. Возраст термальных вод по изотопу  $^{14}$ С в районе термальной площадки месторождения колеблется от 1570 до  $1720 \pm 20$  лет. Полученные значения периода водообмена свидетельствуют о достаточно большой скорости прохождения от зоны питания к области разгрузки, а также глубинных условиях формирования. Исходя их уравнения Kipfer et al. [7], была произведена ориентировочная оценка возраста воды из скважин 2-87 и 3-87 по изотопам гелия. Возраст термальных азотных вод Кульдурского месторождения находится в диапазоне от 10 до 20 тыс. лет.

# Геотермометрия

Универсальным средством для прогноза равновесных температур в геотермальной системе «вода — порода» являются геохимические геотермометры. С помощью Na/K и  $SiO_2$  геотермометров были рассчитаны глубинные температуры. По результатам расчетов температура резервуара составляет 127–130 °C [8, 9].

Кульдурское месторождение находится в области влияния Буреинской смешанной петрогидрогеотермической провинции. Геотермический градиент в данном районе колеблется от 25 до 45 °С/км. Используя метод корреляционной связи между q и отношением концентраций изотопов гелия  $^3$ He/ $^4$ He во флюидах термальных скважин, возможно оценить локальный геотермический градиент [10]. По результатам расчетов в пределах месторождения локальный геотермический градиент можно принять равным 26—27 °С/км. На основе полученных нами данных о температуре прогрева вод и геотермическом градиенте региона была определена глубина формирования термальных вод — 4.7—5.0 км.

# Двухмерная гидрогеологическая модель

Фактический материал (минеральный состав, трещиноватость и пористость водовмещающих пород, генезис вод, глубина погружения, характер разломной зоны, температур флюида и т.д.) лег в основу двумерной численной гидрогеологической модели фильтрации и тепломассопереноса. Предлагаемая модель состоит из трех блоков:

- а) зона термовыводящего канала, приуроченная к разрывному нарушению шириной 10–15 м;
- б) зона повышенной трещиноватости мощностью в районе термальной площадки 80–100 м;
- в) зона монолитных скальных пород. Каждая из зон в данной постановке задачи принимается однородной.

Граничные условия в поставленной задаче определялись следующим образом: вопервых, на верхней границе модели задается инфильтрационное питание (ГУ 2-го рода). Средняя величина инфильтрационного питания для проведения расчетов принята равной W =  $0.00037\,$  м/сут. На реке задавался постоянный напор  $H_p=366\,$  м. Боковые границы непроницаемы. Так как в данной постановке рассматривалось два варианта модели (фильтрационная и с учетом теплового потока), нижняя граница модели в первом варианте была принята непроницаемой, а тепловой поток задавался равным  $62–65\,$  мВт/м². Нижняя граница модели проведена на глубине  $-4000\,$  м (мощность модели  $5000\,$  м), что соответствует максимальной глубине формирования термальных вод. Источником питания термальных вод месторождения Кульдур являются атмосферные осадки, что подтверждается изотопией кислорода и водорода. Разгрузка термальных вод происходит в р. Кульдур и через разломную зону термальной площадки.

Входные параметры трех блоков модели: а) коэффициенты фильтрации зоны трещиноватости k=0.35 м/сут, зоны монолитных скальных пород k от 0.350 до 0.035 м/сут, зоны разрывного нарушения k от 1 до 5 м/сут; б) активная пористость для всей расчетной области была принята равной 5 %; в) продольная дисперсивность задавалась равной 5 м, поперечная -0.5 м; г) теплопроводность твердой фазы (гранитов)  $\lambda$ cp = 2.4 Bт/м·К, теплопроводность флюида  $\lambda=0.65$  Вт/м·К.

В ходе проведения расчетов удалось установить, что структура потока термальных вод в значительной мере контролируется питанием на водоразделах и разгрузкой в реку. При увеличении коэффициента фильтрации разломной зоны от 1 до 5 м/сут в разломной зоне увеличивается скорость потока и к зоне разгрузке происходит миграция более древних термальных вод. Полученные данные (12–14 тыс. лет) моделирования достаточно хорошо соотносятся с результатами определения периода водообмена по изотопам гелия (18 тыс. лет).

При уменьшении коэффициента фильтрации зоны монолитных скальных пород на один порядок (до 0.035 м/сут) отмечается заметное уменьшение скорости потока, что сказывается на максимальном времени нахождения флюида в системе «вода – порода»,

которое в данном случае достигает 40 тыс. лет (по сравнению с первоначальными 12 тыс. лет).

Добавляя на нижней границе тепловой поток с нормальным геотермическим градиентом (~27 °C/км), получаем увеличение скорости потока термальных вод с максимальным временем взаимодействия системы «вода — порода» 7.7 тыс. лет. Таким образом получается, что движение термальных вод на месторождении Кульдур обусловлено двумя противоположными процессами: нисходящей гравитационной фильтрацией холодных метеорных вод и восходящим «всплыванием» нагретых в недрах вод глубоких частей разреза. В результате создается конвективная ячейка циркуляции подземных вод.

# Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать некоторые выводы. Вопервых, азотные термальные воды месторождения Кульдур имеют инфильтрационный генезис по данным  $\delta^2$ H,  $\delta^{18}$ O,  $^3$ H  $^{14}$ C и  $^{235}$ U/ $^{238}$ U, и минимальный период циркуляции составляет 1.5 тыс. лет. Область загрузки терм располагается на отметках 800-1100 м над уровнем моря; атмосферные воды в области питания поступают в гидрогеологическую систему, проникают по разломам до глубины 3-4 км, нагреваются, обогащаются химическими элементами за счет растворения горных пород.

Во-вторых, основным компонентом газовой фазы (как растворенных, так и спонтанных газов) является азот (до 98 об. %), примеси других газов (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) незначительны.  $N_2$  имеет преимущественно атмогенный (возможно с незначительной примесью седиментогенной составляющей) генезис, в то время как CH<sub>4</sub> и CO<sub>2</sub> биогенные. Гелий имеет преимущественно радиогенно-коровый генезис, что подтверждается соотношением изотопов  $^3$ He/ $^4$ He и  $^4$ He/ $^2$ 0Ne.

В-третьих, было установлено, что основным фактором, контролирующим динамику движения флюида, являются коэффициенты фильтрации двух блоков — скального массива и зоны разлома. Модельный период водообмена подземных вод вблизи курорта близок к результатам изотопных определений (<sup>3</sup>He, <sup>14</sup>C). Структура потока подземных вод в значительной степени контролируется питанием на водоразделах и разгрузкой в реку, и разрывное нарушение способствует миграции вод большего возраста к земной поверхности.

Исследование выполнено при поддержке  $P\Phi\Phi H$ , проекты №20-05-00727, № 18-05-00445.

## Список литературы

- 1. Пиннекер Е.В. Закономерности распространения и формирования подземных вод // Проблемы региональной гидрогеологии. М.: Наука, 1977. 195 с.
- 2. Харитонова Н.А., Лямина Л.А., Челноков Г.А., и др. Химический и изотопный состав термальных вод месторождения Кульдур (ЕАО, Россия) // Вестник Московского университета. 2020. № 5. С. 77–91.
- 3. Lyamina L.A., Kharitonova N.A., Karabtsov A.A. Chemical and mineralogical composition of water-bearing materials of the Kuldur Geothermal Reservoir (Jewish Autonomous Region) // Journal IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 459, № 4, P. 1–7. https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/4/042038.
- 4. Diersch H.J.G. FEFLOW.Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag. 2014. 996 p.
- 5. Sano Y., Wakita H. Geographical distribution of  ${}^{3}\text{He}/{}^{4}\text{He}$  ratios in Japan: implications for arc tectonics and incipient magmatism // Journal of Geophys. Res. Solid Earth. 1985. 90 (B10). 8729–8742. https://doi.org/10.1029/JB090iB10p08729.
- 6. Барабанов Л.Н., Дислер В.Н. Азотные термы СССР / Отв. ред. В.В. Иванов. М.: Геоминвод ЦНИИ КиФ. 1968. 120 с.
- 7. Kipfer R., Aeschbach-Hertig W., Peeters F., Stute M. Noble gases in lakes and ground waters // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. V. 47. P. 615–700.
- 8. Fournier R.O. Chemical geotermometers and mixing models for geothermal systems // Geothermics. 1977. V. 5. P. 41–50.
- 9. Fournier R.O. A revised equation for the Na-K geothermometer // Geothermal Resource Council Transections. 1979. V. 3. P. 221–224.
- 10. Поляк Б.Г., Толстихин И.Н., Якуцени В.П. Изотопный состав гелия и тепловой поток геохимический и геофизический аспекты тектогенеза // Геотектоника.1979. № 5. С. 3–23.

# типы подземных вод соляных месторождений

(на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-203-207

# Минькевич И.И., Килин Ю.А.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, iks-org@, mail.ru

Аннотация. Растворимость солей NaCl и KCl очень высокая — 300—350 г/дм<sup>3</sup>. В районах соляных месторождений пластового типа распространены надсолевые, внутрисолевые, подсолевые воды. В зависимости от положения подземные воды так и называются: надсолевые, межсолевые и подсолевые. Кроме природных подземных вод при разработке месторождений образуются техногенные рассолы: конденсационные — в результате взаимодействия влаги, выделяющейся из воздуха, и соляных пород; и закладочные — поступающие в рудник вместе с отходами солей.

**Ключевые слова:** подземные воды, техногенные рассолы, минерализация, химический состав Верхнекамское месторождение солей.

**Abstract** The solubility of the salts NaCl and KCl is very high – 300–350 g/L. In areas of salt deposits within a salt deposit, ground water can be on the its surface, inside the deposit at various depths, as well as surround it from the sides or below. Depending on the position, they are called: supra-salt, lateral, inter-salt and sub-salt. In addition to natural groundwater, technogenic brines are formed during the development of deposits: condensation – as a result of the interaction of moisture emitted from air and salt rocks; filling – representing liquid phase entering the mine together with salt wastes.

Key words: groundwater, technogenic brines, salinity, chemical composition, Verkhnekamskoye salt deposit.

На Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей (ВКМС) присутствуют все типы подземных вод, кроме боковых, характерных для соляно-купольных месторождений.

В надсолевом водоносном комплексе прослеживаются три вертикальные гидрохимические зоны. В верхней части разреза преобладают воды НСО<sub>3</sub>-Са состава. В зоне активного водообмена выделяются водоносные горизонты неоген-четвертичных отложений мощностью до 50 м; пестроцветной толщи (ПТЦ) мощностью от 0 до 350 м, терригеннокарбонатной толщи (ТКТ) мощностью до 130 м. Ниже находится зона более минерализованных вод SO<sub>4</sub>-Ca состава, приуроченная к соляно-мергельной толще (СМТ) мошностью до 100 м, в нижней части которой заключены Cl-Na рассолы. Ниже соляномергельной толщи (СМТ) на глубине 190-630 м залегает покровная каменная соль (соляное зеркало) мощностью до 20 м. Ниже соляного зеркала в незначительном объеме распространены рассолы седиментационного происхождения Cl-Mg, Cl-Mg-Ca состава с минерализацией до 386 г/дм<sup>3</sup>. Подсолевые рассолы залегают в трещинах доломитоангидритовой подсолевой толщи (P<sub>1</sub>ir-P<sub>1</sub>a) на глубинах 600-1000 м. Они имеют в основном Cl-Na состав и минерализацию до 300 г/дм<sup>3</sup>. В целом, полученные гидрохимические данные показывают, что подсолевые воды нижнепермских пород представляют практический интерес для химической промышленности и бальнеологии и какого-либо влияния на разработку Верхнекамского месторождения не оказывают. В подсолевых отложениях иногда имеются напорные солоноватые подземные воды. Весьма крепкие рассолы имеют наибольшее значение в промышленности и используются для получения поваренной соли, нужд содовой промышленности и извлечения других специфических компонентов.

При разработке Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей наибольшее значение имеют воды, приуроченные к кровле соляной залежи (соляному зеркалу). Эти рассолы образуют третью гидрохимическую зону, формирующуюся в результате выщелачивания слабоминерализованными водами покровной каменной соли. В зависимости от степени насыщения NaCl минерализация их достигает 276.91 г/дм<sup>3</sup> (таблица). Они в небольших количествах содержат Br, В и свободный сероводород. На участках разведочных скважин и шахтных стволов, вскрывших покровную каменную соль, возможен контакт надсолевых Cl-Na рассолов с калийно-магниевыми (карналлитовыми) пластами. В этом случае в составе рассола резко возрастает содержание калия и магния, особенно в

районе города Соликамска, где глубина залегания карналлитовой толщи гораздо меньше, чем в Березниках (рис. 1) [1, 6].

Появление этого типа вод в шахтных выработках в виде капежа и протечек указывает на предаварийную ситуацию и не исключает возможного прорыва надсолевых вод через нарушение водоупорной толщи. Аварийные затопления рудников произошли именно из-за прорыва этого типа вод: в июле 1986 г. был затоплен рудник БКРУ-3; в октябре 2006 г. произошел прорыв рассола на БКРУ-1; в ноябре 2014 г. та же авария произошла на СКРУ-2 [4, 5].

При разработке месторождения требуется проведение постоянного мониторинга гидрохимического состава надсолевых вод и сравнения их с составом внутрисолевых.

Внутрисолевые воды встречены при проходке горных выработок. Они представлены крепкими рассолами. Истечение рассолов происходит как из отдельных замкнутых полостей в солях в виде выбросов жидкости с газом, так и путем капельного выделения или увлажнении стенок горных выработок. Рассолы отличаются повышенной минерализацией, большим удельным весом, обогащены хлористыми кальцием и бромидами. Все они относятся к хлоридному типу (по М.Г. Валяшко) и имеют соленость до 320 г/кг и более [2]. Анализ данных растворов показал, что они относятся к седиментационным рассолам различной степени метаморфизации [3]. Изменения в составе первичных рассолов выразились в потере сульфат-иона и магния, частичной замене последнего на кальций и увеличении содержания иона хлора. Наиболее четко приток рассола фиксируется при бурении веерных шпуров и подземных скважин, дренирующих рассолы из пересекаемых тонких прослоев глинистых мергелей в сильвините. При взрывных работах о присутствии рассолов можно судить лишь по увлажнению стенок выработок (таблица).

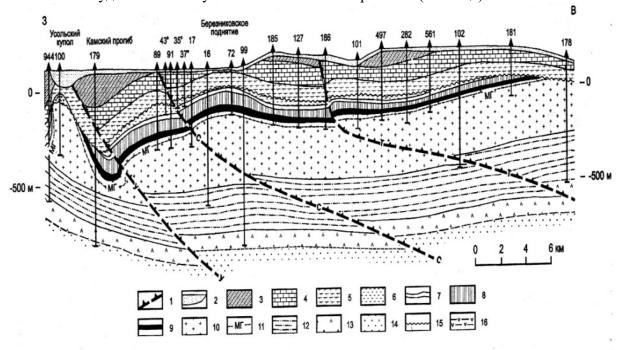


Рис. 1. Геологический разрез ВКМС по линии скважин 944–102. I — надвиги; 2—5 — надсолевой комплекс: 2 — глина кайнозойская (KZ), 3 — пестроцветная толща (ПЦТ), 4 — терригенно-карбонатная толща (ТКТ), 5 — верхняя часть соляно-мергельной толщи (СМТ2); 6—1 — соляной комплекс: 6 — каменная соль нижней части СМТ, 7 — покровная каменная соль (ПКС), 8 — сильвинито-карналлитовая зона, 9 — сильвинитовая зона с пластом 6, 10 — подстилающая каменная соль (ПДКС), 11 — маркирующий горизонт (МГ); 12—14 — подсолевой комплекс: 12 — преимущественно алевролиты нижнеиренского подгоризонта (11), 11 — ангидриты филипповского горизонта, 11 — терригенные породы артинского яруса; 11 — поверхность подземного выщелачивания кровли соляной толщи; 110 — гипсово-глинистая «шляпа».

По химическому составу межсолевые рассолы седиментационного происхождения представляют предельно насыщенные сильно метаморфизованные хлоридно-магниевые и хлоридно-магниево-кальциевые рассолы с повышенным содержанием брома, бора, лития и других элементов, минерализацией от 360.96 до 386.54 г/дм $^3$ . Рассолы седиментогенного генезиса находятся в физико-химическом равновесии с вмещающими породами, время их образования  $P_1kg$ .

Состав внутрисолевых рассолов Верхнекамского месторождения

№ п/п	<b>J</b> 1	2 7/2253									
JNº 11/11	NaCl	KC1	Состав, MgCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub>	CaSO <sub>4</sub>	∑ солей	ρ, г/cм <sup>3</sup>				
БПКРУ-1											
1	47.7	55.6	164.7	113.6	0.3	381.9	1.276				
2	38.9	46.7	210.4	104.9	0.3	401.2	1.294				
3	37.4	49.1	200.8	101.2	сл.	388.6	1.280				
4	42.5	41.8	197.9	62.3	0.3	344.8	1.275				
			БП	КРУ-2							
5	35.3	31.8	223.8	108.0	сл.	398.9	1.292				
6	29.0	35.1	229.8	109.9	0.1	403.9	1.292				
7	89.3	57.2	97.5	111.4	0.2	355.6	1.258				
	СПКРУ-1										
8	57.8	53.3	175.0	89.0	сл.	375.1	1.270				

Воды техногенного происхождения закладочными рассолами, смешанными с менее минерализованными надсолевыми водами. Результаты мониторинга шахтных вод приведены в таблице. Источником исходных результатов по химическому составу воды послужили протоколы ПАО «Уралкалий» на СКРУ-3 за 2017–2020 гг., всего 238 анализов.

Конденсационные, или вентиляционные, рассолы образуются в результате взаимодействия влаги, выделяющейся из воздуха, и соляных пород. Количество конденсационной влаги и темпы выноса ее из рудника определяются количеством нагнетаемого для проветривания выработок воздуха и его метеорологическими характеристиками. Состав рассолов конденсационного происхождения находится в прямой зависимости от состава солей, вскрытых горными выработками, и времени существования рассолов.

В результате выщелачивания соляных пород конденсационная влага обогащается хлоридами Na, K, Mg, Ca. Минерализация конденсационных рассолов по наблюдаемым данным изменяется от 360.2 до 356.2 г/дм<sup>3</sup>.

В течение года в зависимости от сезона и интенсивности воздухообмена происходит постоянная миграция конденсационных рассолов в выработках. Наибольшее их скопление и постоянное наращивание объёма наблюдается в выработках весьма затрудненного воздухообмена, которые изолированы от вентиляционного потока. Значительные объемы рассолов нарушают нормальный режим работ, снижают устойчивость горных выработок, растворяют соляные породы, агрессивно воздействуют на шахтное поле.

Закладочные рассолы — это жидкая фаза, поступающая в рудник вместе с отходами переработки солей. Она отжимается в процессе уплотнения закладочного материала в горные выработки. Это хлоридные натриево-калиевые рассолы с минерализацией до 362.3 г/дм $^3$ .

Закладочные работы проводятся для обеспечения ненарушенности водозащитной толщи, уменьшения оседания земной поверхности под городской застройкой и промышленными площадками, а также уменьшения негативного влияния отходов на экологическую обстановку в районе. Закладку ведут механическим и гидравлическим способом. Отжимаемые рассолы агрессивно действуют на карналлитовую породу, пласты которой покрывают сильвинитовую толщу.

Кроме перечисленных типов техногенных вод выделяются рассолы смешанного типа, представляющие собой смешение конденсата, надсолевых вод, техногенных вод и выщелачивания карналлита, рассолы хлоридно-натриево-калиевого и хлоридно-магниевого состава с минерализацией от 359.0 до 367.8 г/дм<sup>3</sup>.

На Березниковском третьем калийном рудоуправлении известны случаи фильтрации закладочных рассолов через целики в соседние и нижепройденные выработки, которые были одной из причин крупной аварии, приведшей к затоплению рудника. Техногенез в условиях Верхнекамского месторождения оказывает большое влияние на окружающую среду, увеличивая проницаемость пород и способствуя увеличению масштабов загрязнения [4]. Размещение предприятий обогатительных фабрик СКРУ-1 и СКРУ-2 на низких надпойменных террасах р. Камы провоцирует загрязнение подземных и поверхностных вод. В подземной гидросфере наиболее загрязнены воды аллювиальных отложений р. Камы (пески с гравием и галькой) – минерализация подземных вод аллювия составляет 100 г/дм<sup>3</sup>.

Масштабные загрязнения гидросферы происходят также в местах складирования солеотвалов (рис. 2). Атмосферные осадки стекают по поверхности и просачиваются в толщу отвала образуя различные карстовые формы, карры, поноры, ниши и т.д.

Сильному загрязнению за счет прямого сброса подвергаются реки Поповка, Володинка, Чёрная. Сейчас они являются, по сути, канализационными коллекторами.



Рис. 2. Карры, поноры и ниши солеотвалов (г. Березники).

Влияние реки Чёрной отражается на составе камской воды, которая выше ее устья имеет гидрокарбонатный состав и минерализацию  $184 \text{ мг/дм}^3$ , а в 0.5 км ниже – хлоридный состав и минерализацию  $461 \text{ мг/дм}^3$ .

# Выводы

На Верхнекамском месторождении солей выделяется следующие типы вод: водоносный горизонт неоген-четвертичных отложений гидрокарбонатно-натриевых вод с минерализацией менее 1 г/дм<sup>3</sup>, водоносный горизонт пестроцветной толщи (ПЦТ), имеющий гидрокарбонатно-кальциевый состав с минерализацией до 0.2–0.4 г/дм<sup>3</sup>, водоносный горизонт терригенно-карбонатной толщи и верхних слоев соляно-мергельной толщи (СМТ) с минерализацией от 2 до 100 г/дм<sup>3</sup> сульфатно-кальциево-магниевого, хлоридно-сульфатный-натриевого состава, водоносный горизонт средних и нижних слоев соляно-мергельной толщи (СМТ) — хлоридно-натириевые рассолы выщелачивания с минерализацией до 300 г/дм<sup>3</sup>. Рассолы соляной залежи имеют седиментационное происхождение хлоридно-магниевый, хлоридно-магниево-кальциевый состав, минерализацией до 386 г/дм<sup>3</sup>; подсолевые рассолы залегают в трещинах доломито-ангидритовой подсолевой толщи. Они имеют в основном хлоридно-натриевый состав и минерализацию до 300 г/дм<sup>3</sup>.

Следует отметить, что из всех рассмотренных типов вод главную опасность при разработке соляных месторождений представляют воды надсолевого комплекса. Появление этих вод в шахтных выработках указывает на предаварийную ситуацию и не исключает

возможного прорыва надсолевых вод через нарушение водоупорной толщи. Наиболее интенсивно на месторождении протекают процессы выщелачивания солей под влиянием как естественных, так и техногенных факторов. Техногенные внутрисолевые рассолы (конденсационные и закладочные) агрессивно воздействуют на различные соляные породы, понижая несущую способность целиков.

# Список литературы

- 1. Бельтюков Г.В. Инженерно-геологические процессы, возникающие при разработке соляных залежей // Вестник Перм. ун-та. Геология. 1999. Вып. 5. С. 217–222.
- 2. Валяшко М.Г. Основные химические типы вод и их формирование // Докл. АН СССР. 1955. Т. 102, С. 315–318.
  - 3. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. 429 с.
- 4. Котельников А.Н., Минькевич И.И. Гидрогеологические условия формирования провала на шахтном поле БКРУ–3 // Катастрофы и аварии на закарстованных территориях: Тез. докл. совещания. Пермь. Дом науки и техники, 1990. С. 49–50.
- 5. Лаптев Б.В. Аварийные ситуации на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 8. С. 28–31.
- 6. Потапов А.А. Региональная численная геофильтрационная модель южной части Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. 2016. Вып. 3. С. 4–22.
- 7. Фетисов В.В., Катаева Е.П., Фетисова Н.Ф. Взаимодействие природных и техногенных рассолов Верхнекамского месторождения солей с основными минералами соляной толщи // Изв. Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 9. С. 87–92.

# ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЖНО ПОСТРОЕННОГО ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НА ЮГО-ЗАПАДНОМ ФЛАНГЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-208-212

Павлов С.Х.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, spavlov@crust.irk.ru

**Аннотация.** С помощью физико-химического моделирования прослежены процессы формирования метановых терм в осадочных породах. Установлено определяющее влияние органического вещества, которое содержится в породе, на интенсивность протекания гидрогеохимического процесса, количество образующегося метана, возможность формирования высокоминерализованных (инверсионных) гидрокарбонатных натриевых подземных вод в пластовых условиях осадочных бассейнов без привлечения их из внешних источников.

**Ключевые слова:** метановые термы, термодинамическое моделирование, физико-химическое взаимодействие, состав модельных и природных растворов.

**Abstract.** The processes of formation of methane hot springs in sedimentary rocks are traced using physicochemical modeling. The determining influence of the organic matter contained in the rock is established: on the intensity of the hydrogeochemical process; on the amount of methane formed; on the possibility of forming highly mineralized (inversion) sodium bicarbonate groundwater in the formation conditions of sedimentary basins without attracting them from external sources.

**Key words:** methane hot springs, thermodynamic modeling, physicochemical interaction, compositions of model and natural solutions.

Исследование системы «вода – порода – газ – живое вещество», обладающей рядом фундаментальных свойств, проводится как представителями точных наук, так и исследователями из различных направлений геологической науки. Такой многосторонний подход к важному природному объекту дает возможность раскрыть разные его стороны на современном научном уровне и приблизиться к более полному пониманию и раскрытию процессов формирования различных элементов этой системы. Тем не менее, несмотря на определенные успехи в этой области, многие вопросы все еще весьма далеки от своего решения и находятся в стадии острой дискуссии. С одной стороны, это связано с явно недостаточным фактологическим материалом, раскрывающим пространственные и временные характеристики чрезвычайно сложной системы, являющейся наиболее динамичной частью геологического пространства, с другой – прослеживается явно недостаточная методическая разработка ряда направлений как в гидрогеологии, так и в геологии в целом.

Несмотря на огромное увеличение количества глубоких скважин, вопрос об отсутствии или наличии движения подземных вод и направлении их движения, определяющий их гидрогеохимические характеристики, остается далеким от своего решения. Более того, в работе [1] убедительно показана необходимость учета геологической неоднородности как ключевой проблемы гидрогеодинамики, кардинально меняющей представление о движении подземных вод в верхних горизонтах платформенных структур. Что же касается рифтовых и рифтоподобных зон, то они отличаются особо сложными гидрогеологическими условиями [2], однако по-прежнему продолжают рассматриваться по весьма упрощенным схемам.

В последнее время появился ряд работ, посвященных формированию азотных терм Байкальской рифтовой зоны [3, 4 и др.], в которых, наряду с выяснением механизмов формирования состава азотных терм, предложены схемы их движения. Показательно, что одни и те же авторы для одной и той же территории принципиально по-разному рисуют умозрительные схемы направления движения азотных терм. В одном случае «движение воды происходит в крест простирания разломов по поверхности соскальзывания отдельных блоков, которые во впадины не продолжаются, и термальная вода, достигая разделяющих ее массивов и впадин разломов, поднимается к поверхности» [3]. В другой схеме этих же авторов под более чем 8-километровой толщей осадочных пород вода в кристаллических породах перемещается от одного борта впадины до противоположного [4]. Во многих

работах отечественных и зарубежных исследователей окружающие Байкальскую впадину горные сооружения считаются областью питания, а сама впадина – областью разгрузки.

В отличие от простых гидрогеохимических условий, рассмотренных в работах [3, 4 и мн. др.], в Байкальской рифтовой зоне имеются весьма сложные гидрогеологические, гидрогеодинамические и гидрогеохимические условия [5], где, подобно Кавказским Минеральным Водам, на разных гипсометрических уровнях одного и того же разреза распространены различные химические типы минеральных вод, движущихся в противоположных направлениях [6], происхождение которых активно обсуждается [7, 8 и др.].

В Тункинской впадине установлено существование двух водонапорных систем, в которых формирование ресурсов и состава подземных вод происходит принципиально различными путями [5]. В кристаллических породах фундамента впадины широко распространены азотные и углекислые термы, которые имеют инфильтрационное происхождение и вместе с пресными водами представляют единую водонапорную систему, развитие которой определяется динамикой инфильтрационных вод в области питания в Тункинских гольцах. В глубоких же горизонтах осадочной толщи распространены метановые термы седиментационного генезиса. В этой работе были исследованы физикохимические взаимодействия воды с различными породами, слагающими разрез, и прослежены процессы формирования азотных, углекислых и метановых терм. Если процессы формирования азотных и углекислых терм исследовались с реальными породами, в которых были определены содержания летучих, то химический состав осадочных пород реконструировался. Неполный силикатный анализ этих пород, заимствованный из работы [9], последовательно дополнялся средними величинами летучих из работ [10, 11] с последующей дополнительной их корректировкой, благодаря чему состав модельных растворов приближался к составу реальных терм.

Средние содержания органического углерода в осадочных породах, которые принимались в расчет, не превышают 1 % [10, 11], тогда как его концентрации в осадочной толще Тункинской впадины достигают 5–8 % [12]. В связи с этим в данном исследовании поставлена задача выяснить влияние органического вещества на формирование состава подземных вод глубоких горизонтов, поэтому исследование проведено уже не на примере ограниченных данных химического состава пород Тункинской впадины, а для более масштабных обобщений по обширным площадям регионального уровня, для которых рассчитаны средние значения химического состава осадочных пород. С этой целью, как и в работе [5] с помощью программного комплекса «Селектор» [13, 14], были изучены физико-химические взаимодействия воды с глинистым сланцем [11] по степени протекания гидрогеохимического процесса, когда масса воды, равная 1 кг, остается постоянной на всех этапах взаимодействия, а количество породы увеличивается от  $10^{-6}$  до 10 с шагом 0.1. В системе, закрытой к атмосфере, температура и давление были постоянными и равны T=50 °С и P=70 бар. В модель дополнительно были введены гомологи углеводородов и органические кислоты.

Были проведены три серии расчетов для содержаний органического углерода в породе 1, 2 и 3 %. В таблице представлены результаты расчетов для величин отношения порода/вода 0.1 и 1 для содержаний углерода 1 и 2 % и 0.04, 0.1, 0.4 и 1 для содержаний углерода 3 %. Для сравнения в таблицу включены анализы метановых вод Тункинской впадины [5] и высококарбонатных подземных вод Тунгорского газонефтяного месторождения Охотско-Сахалинского бассейна [15].

Результаты расчетов показывают, что в этих условиях формируются высокощелочные с высокими восстановительными свойствами растворы, минерализация которых увеличивается не только по мере увеличения степени взаимодействия воды с породой, но куда как интенсивнее с повышением содержания органического вещества в породе, и при максимальной степени взаимодействия минерализация растворов изменяется от 2.5 до 8.7 и 17.8 г/кг  $H_2O$ . Во всех случаях формируются метановые воды содового состава, в которых

содержание щелочно-земельных металлов остается на очень низком уровне. Концентрация калия хотя и незначительно, но повышается как с увеличением степени взаимодействия, так и с увеличением содержания органического вещества в породе. Концентрация аммония многократно превышает содержание этих катионов.

Величины Eh, pH, минерализации и компонентов модельных растворов (мг/кг  $_{2}O$ ) в системе «вода — глинистый сланец» при  $_{7}D \circ C$  и  $_{7}$ 

и значением отношения порода/вода в сравнении с природными термами

Copr, %	Порода/ Вода	Eh, B	рН	Минерализ ация	$\mathrm{NH_4}^+$	$K^+$	$\mathrm{Na}^+$	$Ca^{2+}$	${ m Mg}^{2+}$	HCO <sub>3</sub> -	$\mathrm{CO_3}^{2-}$	$HS^{-}$
1	0.1	-0.470	9.41	1345	11	0.5	415	0.5	0	537	154	0.67
	1	-0.459	9.21	2494	103	0.8	677	0.9	0	450	90	0.59
2	0.1	-0.461	9.27	1877	14	0.7	569	0.7	0	887	193	0.81
	1	-0.411	8.66	8702	83	3.2	2598	0.7	0	4738	328	0.64
3	0.04	-0.365	7.95	1322	25	1.4	330	3.5	0.2	876	8	0.12
	0.1	-0.388	8.30	3116	48	6.6	830	1.3	0.1	2033	50	0.28
	0.4	-0.407	8.62	9967	60	3.6	2895	0.5	0	6123	388	0.55
	1	-0.387	8.38	17828	80	6.5	5268	0.2	0.2	10918	428	0.27
-	P-1	-0.2	8.4	1291	3	2.6	327	25	7.3	840	25	0
	2016– 048)*	_	_	9600	_	2781		20	10	6464		_
	2080– 10)**	_	_	10100	_	3434 14 10 4		470	64	_		

Продолжение таблицы

Copr, %	Порода/ Вода	Cl-	F-	$\mathrm{HSiO_{3}^{-}}$	$\mathrm{SiO_2}^\circ$					$N_2$	$CO_2$	CH <sub>4</sub>
	, ,					$\mathrm{CO_2}^\circ$	CH₄°	$N_2^{\circ}$	$\mathrm{NH_3}^\circ$	Газ	, мл/кг	$H_2O$
1	0.1	63	42	30	15	0.2	555	0.7	62	0	0	0
	1	634	121	19	15	0.3	1085	19	366	161	0,04	6364
2	0.1	62	42	22	15	0.5	910	0,8	58	0.5	0	374
												1548
	1	634	208	5	15	10	882	14	73	365	4	8
3	0.04	25	16	1	15	11	725	0.8	5	0	0	0
	0.1	62	41	2	15	10	908	1	21	2	0,3	1276
	0.4	249	166	5	15	15	890	8	47	113	3	8966
												2449
	1	636	425	3	14	45	877	10	33	393	30	2
	*(728– 766)	75	1	0	33	0"	82"	17"	0"	8"	0.5"	91"
20	2016– 948)**	336	_			_	_		_		_	_
21	2080– 10)***	1830	_	ı	ı			_		ı	_	_

Примечание. \* — химический состав метановых термальных вод из скважины P-1 в интервале 728—766 м в Тункинской впадине; \*\*, \*\*\* — химический состав подземных вод Тунгорского газонефтяного месторождения Охотско-Сахалинского бассейна в интервале опробования (м): \*\* — 2016—2048; \*\*\* — 2080—2110; " — содержание растворенных и свободных газов в скважине P-1 в Тункинской впадине выражено в %.

В анионной части растворов, кроме главных гидрокарбонатных и карбонатных ионов, повышенные и даже высокие концентрации имеют ионы хлора и фтора. Весьма

примечательной особенностью данной системы является то, что при значительном содержании серы в породе она практически полностью концентрируется в твердой фазе в форме пирита и в микроколичествах присутствует в растворе в форме гидросульфида. Характерной особенностью системы является незначительное присутствие в растворе кремния в форме гидросиликатного иона и кремниевой кислоты.

Благодаря способности углерода к диспропорционированию, интенсивное развитие в системе получили как окисленные, так и восстановленные формы углерода, которые не только присутствуют в растворенной форме, но формируют и газовую фазу. Наряду с гидрокарбонатными и карбонатными ионами в растворе присутствует углекислота. Ее содержание, как в растворенной форме, так и в газовой фазе, низкое, но имеет устойчивую тенденцию к повышению с увеличением содержания органического углерода в породе. С такой же закономерностью в системе происходит увеличение метана, содержание которого, в отличие от углекислоты, высокое и очень высокое. Содержание растворенного метана в разных растворах ( $C_{\rm opr}$ ) из-за низкой его растворимости при одинаковой степени взаимодействия колеблется около средней величины, тогда как в газовой фазе оно многократно увеличивается и достигает 6.4, 15.5 и 24.5 л/кг  $H_2O$ . В газовой фазе в незначительном количестве появляется также этан, содержание которого увеличивается от сотых до первых единиц десятых долей мг/кг  $H_2O$ . Азот присутствует в форме аммония, аммиака и азота в растворенной и газовой фазах. С появлением газовой фазы начинается перераспределение азота между раствором и газовой фазой в пользу газовой фазы.

В растворах породы, содержащей 1 и 2 % органического углерода, появляются карбоксильная группа и ион уксусной кислоты, а в растворах породы с 3 % органического углерода добавляется еще и ацетат натрия. Содержания их невелики, максимальные значения достигают десятых долей и первых мг/кгH<sub>2</sub>O. Однако здесь нужно учитывать, что это соответствует условиям полного равновесия, тогда как при более высоком уровне метастабильности количество их было явно выше. Тем не менее важно то, что они образуются и при увеличении концентрации органического вещества отмечается их рост, а это является одним из важных факторов интенсификации гидрогеохимического процесса.

Сравнение модельных растворов с реальными термами показывает следующее. Величине минерализации метановых терм Тункинской впадины наиболее близки модельные растворы, сформировавшиеся при величинах отношения порода/вода 0.1 для 1 % Сорг и 0.04 для 3 % Сорг. Но наиболее близок к природному состав второго модельного раствора. Почти идентичны природным количества щелочных и гидрокарбонатных ионов, и сопоставимы значения хлора и кремния. Значительные отличия имеют щелочно-земельные металлы и фтор. Поведение щелочно-земельных металлов является слабым звеном модельных растворов на данном этапе применения моделирования. Что же касается фтора, то здесь явно проявляется эффект геологической неоднородности относительно химического состава пород, который достаточно убедительно раскрыт в работе [16].

Два анализа высококарбонатных вод по величине минерализации достаточно близки друг другу и соответствуют модельному раствору с 3 %  $C_{\rm opr}$  в породе при величине отношения порода/вода 0.4. Однако по ионно-солевому составу наиболее близка модельному раствору вода с минерализацией 9.6 г/кг  $H_2O$ . Связано это прежде всего с величиной иона хлора, которая в обоих растворах очень близка, соответственно, и концентрации карбонатных ионов и натрия практически равны. Во втором анализе незначительное увеличение минерализации природной воды до  $10.1 \, \text{г/кг} \, H_2O$  сопровождается почти восьмикратным повышением концентрации иона хлора и существенным уменьшением гидрокарбонатных ионов, что приводит к значительному различию с составом модельного раствора. Здесь важно то, что в первом случае соответствие состава модельного раствора и природной воды достигнуто при взаимодействии породы среднего химического состава с повышенным содержанием  $C_{\rm opr}$  с химически чистой водой без участия дополнительных источников хлора. Известно, что отклонения содержаний химических элементов в породе от их средних значений могут иметь достаточно широкий интервал, поэтому и здесь вполне

реально допущение того, что повышенное содержание хлора в термальной воде связано, прежде всего, с его повышенным, относительно среднего значения, содержанием в породе.

Таким образом, количественное исследование физико-химических взаимодействий в системе «вода – глинистый сланец», который имеет средний химический состав и содержит различное количество органического вещества, показало следующее. Присутствие в породе органического вещества и его количество являются основным фактором активности гидрогеохимического процесса, который многократно увеличивает его интенсивность. В результате взаимодействия формируются щелочные и высокощелочные с высокими восстановительными свойствами бессульфатные метановые воды содового состава, в которых образуется газовая фаза весьма значительного объема. Средний состав породы обеспечивает формирование растворов, которые имеют высокую сходимость как с низко-, так и с высокоминерализованными природными термальными водами. Наряду с этим четко проявилась хорошо выраженная в природе геологическая неоднородность, в данном случае по химическому составу пород. Этот фактор формирования состава подземных вод требует пристального внимания при исследовании гидрогеохимических процессов, без учета которого процессы формирования состава подземных вод нельзя считать раскрытыми. Высокоминерализованные (инверсионные) гидрокарбонатные натриевые воды, достаточно широко распространенные во многих артезианских бассейнах, формируются внутри системы «вода – порода» без привлечения каких-либо компонентов из внешних источников.

# Список литературы

- 1. Шестаков В.М. Учет геологической неоднородности ключевая проблема гидрогеодинамики // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2003. № 1. С. 29–28.
- 2. Карцев А.А., Абукова Л.А. Нефтегазовая гидрогеология на современном этапе // Известия вузов. Нефть и газ. 1998. № 4. С. 12-17.
- 3. Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 5. С. 647–664.
- 4. Шварцев С.Л., Замана Л.В., Плюснин А.М., Токаренко О.Г. Равновесие азотных терм Байкальской рифтовой зоны с минералами водовмещающих пород как основа для выявления механизмов их формирования // Геохимия. 2015. № 8. С. 720–733.
- 5. Павлов С.Х., Чудненко К.В., Голубев В.А., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Геологические факторы и физико-химические процессы формирования подземных вод Тункинской впадины // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 221–248. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0346.
  - 6. Кавказские Минеральные Воды / Под ред. В.В. Иванова М.: ЦНИИКФ, 1972. 158 с.
- 7. Лаврушин В.Ю., Лисенков А.Б., Айдаркожина А.С. Генезис Ессентукского месторождения углекислых вод (Северный Кавказ) // Геохимия. 2020. Т. 65, № 1. С. 77–91.
- 8. Абрамов В.Ю., Вавичкин А.Ю. Особенности формирования термогазохимического состава минеральных вод Ессентукского месторождения // Разведка и охрана недр. 2010. № 10. С. 27–32.
- 9. Мазилов В.Н., Кашик С.А., Ломоносова Т.К. Олигоценовые отложения Тункинской впадины (Байкальская рифтовая зона) // Геология и геофизика. 1993. Т. 34, № 8. С. 81–87.
- 10. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
- 11. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 182 с.
- 12. Логачев Н.А. Кайнозойские континентальные отложения впадин байкальского типа // Известия АН СССР, серия геологическая. 1958. № 4. С. 18–29.
- 13. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.
- 14. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010. 287 с.
- 15. Киреева Т.А., Всеволожский В.А. Инверсионные гидрокарбонатнонатриевые воды как показатель нефтегазоносности глубоких частей геологического разреза // Электронный журнал «Глубинная нефть» (ISSN 2306-3114) http://journal.deepoil.ru/index. 2013. № 4.
- 16. Павлов С.Х., Чудненко К.В., Хромов А.В. Моделирование формирования фторидных азотных терм в системе «вода кристаллическая порода» // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 2. С. 378–396. DOI: 10.5800/GT-2020-11-2-0481.

# НОВЫЕ ДАННЫЕ О СОСТАВЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В АННЕНСКИХ ТЕРМАЛЬНЫХ ВОДАХ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-213-216

# Потурай В.А.

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, poturay85@yandex.ru

Аннотация. В настоящей статье приводятся новые данные о составе органических соединений средней летучести в термальных водах Анненского геотермального месторождения (Дальний Восток, Россия). Всего в горячих водах установлено 98 органических компонентов, которые относятся к 14 гомологическим рядам. В этих водах широко распространены эфиры, азотсодержащие и ароматические соединения и алканы. Генезис установленных соединений предположительно оценивается как термогенный и биогенный (преимущественно бактериальный).

Ключевые слова: термальный воды, органические соединения, эфиры, алканы, генезис.

**Abstract**. This paper provides new data on the composition of organic matter in the thermal waters of the Annenskii Field (Far East, Russia). In total, 98 compounds, 14 homologous series were found in hot waters. Ethers, nitrogen-containing compounds, aromatic hydrocarbons and alkanes are widespread. The genesis of the established compounds is presumably assessed as thermogenic and biogenic (mainly bacterial).

Key words: thermal waters, organic compounds, ethers, alkanes, genesis.

# Введение

В ходе экспедиционных работ в пределах Анненского геотермального месторождения были отобраны две партии проб термальной воды в 2012 и 2014 гг. Однако до сих пор были использованы только данные анализов, полученных в 2014 г., согласно которым в термальных водах Анненского месторождения установлено 72 органических компонента, относящихся к 13 гомологическим рядам, а максимального распространения достигают алканы и эфиры [1, 2]. Однако на основе этих данных была сделана только описательная характеристика состава органического вещества. Результаты анализов 2012 г. не публиковались и не использовались при обобщении данных по гидротермальным системам ДВ. Вместе с тем в 2012 г. пробы воды были отобраны с промежутком в 30 мин., что дает возможность проследить кратковременные изменения состава ОВ. Вовлечение данных 2012 г. позволит более детально изучить состав, поведение и генезис органического вещества в анненских термах, предварительно оценить кратковременные (период 30 минут) и долговременные (годы) вариации его состава и пополнить базу данных по органическим соединениям средней летучести в термальных водах ДВ.

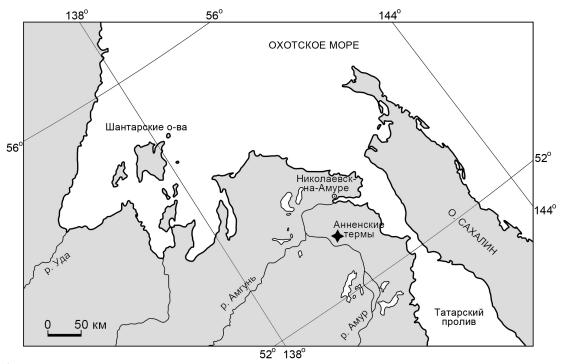
# Общая характеристика района исследования

Анненское геотермальное месторождение находится в Хабаровском крае, в 125 км от г. Николаевска-на-Амуре и в 6.5 км от пристани Сусанино, в пределах низкогорного рельефа низовьев р. Амур, у западных отрогов северной оконечности хребта Сихотэ-Алинь (рисунок). Район месторождения сложен главным образом верхнемеловыми эффузивными и туфогенно-осадочными отложениями больбинской и татаркинской свит [3, 4]. В настоящее время эксплуатируются скважины № 2 — глубиной 43.8 м и № 21 — глубиной 201.6 м. Воды имеют температуру на выходе 54 °С, слабоминерализованные (минерализация до 0.3 г/дм³), щелочные кремниевые гидрокарбонатные натриевые с повышенным содержанием фтора (2.5–3.0 мг/дм³), при этом до 85 % компонентов находятся в ионной форме, до 15 % — в комплексах с гидрокарбонат-ионом [3–5].

### Методика исследования

Пробы термальной воды были отобраны непосредственно из скважин № 2 и № 21 в сентябре 2012 и августе 2014 г. Из скважины № 2 в 2012 г. пробы воды были отобраны с промежутком в 30 мин. Для концентрирования органических соединений использовали метод твердофазной экстракции. Твердофазную экстракцию проводили в лаборатории Хабаровского краевого центра экологического мониторинга и прогнозирования ЧС – КЦЭМП. Качественный анализ органических соединений осуществляли методом

капиллярной газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией [6, 7] на газовом хроматомасс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010S в лаборатории КЦЭМП (аналитик – В.Л. Рапопорт) и Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra в лаборатории ИКАРП ДВО РАН (аналитик – В.А. Потурай). Были получены хроматограммы по общему ионному току (ОИТ), по которым идентифицировались органические соединения. Для более надежной идентификации спектры регистрировали в режиме селективного ионного мониторинга (СИМ) по характеристическим ионам (m/z 57; 60; 91; 112; 128; 142; 178; 256). Для каждого идентифицированного соединения были получены относительные концентрации в процентах. Сумма всех компонентов, установленных в пробе, равнялась 100 %.



Обзорная карта с местом расположения Анненского геотермального месторождения.

Максимального распространения в исследуемых водах достигают эфиры карбоновых кислот. Этот класс органических соединений представлен 14 компонентами, доля которых во всех пробах колеблется от 21 до 60 %, со слабым преобладанием четных гомологов (содержащих четное число атомов углерода в молекуле). При этом среди них преобладают низкомолекулярные бутиловые эфиры состава С6-С8 (7 соединений), а максимальной концентрации достигает бутиловый эфир акриловой кислоты (бутилакрилат), доля которого колеблется от 5 до 33 %. Простые и сложные эфиры являются характерными компонентами в континентальных термальных водах. Это связано с их широким распространением в биосфере и хорошей растворимостью в воде. В работе [8] говорится, что основными формами миграции ОВ в термоминеральных водах Западного Забайкалья являются также простые эфиры, а среди них преобладает именно бутиловый эфир (бутиловый эфир диэтиленгликоля). Азотсодержащие соединения в исследуемых термальных водах также являются доминирующими, однако это проявляется только по данным 2012 г., когда их относительные концентрации колебались от 33 до 54 % от состава ОВ, а количество соединений от 4 до 7. В 2014 г. их доля снизилась до 1.5 %, а количество соединений до 3. Это соединение содержит наряду с азотом ароматическую структуру, что является характерным для термальных вод. Присутствие азотсодержащих компонентов в термальных водах, вероятно, объясняется преимущественно азотным газовым составом терм и наличием микроорганизмов функциональных групп азота. Многие из установленных азотсодержащих компонентов относятся к гетероароматическим соединениям, то есть содержащим наряду с азотом еще и циклическую структуру. Эти компоненты образуются в результате разложения

погребенного органического вещества под действием высокой температуры, то есть имеют термогенное происхождение [9]. Они являются важными продуктами раннего разложения ОВ, поэтому в пробах воды 2014 г. гетероциклы уже не установлены. Кроме этого, резкое снижение относительной концентрации и разнообразия азотсодержащих соединений (в основном за счет удаления гетероароматики) за два года может объясняться также микробиологической трансформацией ОВ в термальных водах и деградацией этих компонентов с образованием простых углеводородов и их изомеров, разнообразие которых резко увеличилось по данным 2014 г. Известно, что устойчивость ОВ уменьшается с повышением температуры и давления. В сложных углеводородных молекулах происходит разрыв углеродных связей, в результате чего уменьшается доля УВ сложного состава и возрастает концентрация простых УВ [10].

Наряду с эфирами карбоновых кислот и азотсодержащими соединениями, которые доминируют в анненских водах, к веществам с высоким относительным содержанием можно отнести предельные (от 3 до 16 %, с максимумом − 50 % в скважине № 2 в 2014 г.) и ароматические (до 17 %) УВ, а также карбоновые кислоты (до 17 %). Значимые относительные содержания демонстрируют и спирты, достигающие 9 %. Остальные ряды органических компонентов гораздо менее распространены и представлены изомерами предельных УВ, альдегидами, кетонами, терпенами, хинонами и стероидами.

Для детального рассмотрения вариаций состава ОВ в анненских термах, был произведен отбор проб термальной воды из скважины № 2 с периодом в 30 мин в 2012 г. В составе ОВ не произошло больших изменений, однако наблюдается незначительное уменьшение доли предельных и ароматических УВ, азотсодержащих соединений, хинонов и увеличение относительного содержания карбоновых кислот и их эфиров. Остальные гомологические ряды органических соединений не претерпели в своем составе и в относительных содержаниях видимых изменений. За длительный период (два года) вариации состава ОВ становятся более заметными. В скважине № 2 резкий скачок вверх демонстрируют алканы (с 3 до 50 %), а резкое снижение наблюдается у азотсодержащих компонентов (с 53.7 до 0.2 %). Также наблюдается небольшое снижение ароматических УВ, эфиров и альдегидов. К органическим соединениям, которые появились в 2014 г., относятся изомеры предельных УВ, спирты, кетоны и стероиды. В скважине № 21 за два года также произошло увеличение доли алканов и эфиров и снижение ароматических УВ, карбоновых кислот и азотсодержащих соединений. Подобная картина наблюдалась нами и в Кульдурском геотермальном месторождении, где кратковременные характеризуются незаметными флуктуациями состава ОВ, а долговременные – довольно сильными колебаниями [11]. Однако в кульдурских термах резкие колебания состава ОВ за длительный период связаны с увеличением разнообразия ОВ, вызванного притоком биогенного ОВ, а в анненских термах вариации инициированы, наоборот, увеличением доли алканов термогенного генезиса и снижением доли азотсодержащих соединений.

# Заключение

В результате исследования состава ОВ средней летучести в термальных водах Анненского месторождения, проведенного в 2012–2014 гг., установлено 98 органических соединений, относящихся к 14 гомологическим рядам. Максимального распространения достигают эфиры карбоновых кислот. К доминирующим соединениям также относятся предельные, ароматические, азотсодержащие УВ и карбоновые кислоты. Происхождение этих компонентов связано с процессами, происходящими в системе «вода – порода» и бактериальной деятельностью. Остальные гомологические ряды органических соединений гораздо менее распространены и имеют, вероятно, биогенный генезис. Кратковременные вариации состава ОВ (период 30 мин) характеризуются незаметными флуктуациями, а долгосрочные (период два года) – довольно сильными колебаниями состава ОВ, вызванными увеличением доли алканов термогенного генезиса и снижением доли азотсодержащих соединений.

- 1. Потурай В.А. Органическое вещество в подземных и поверхностных водах района Анненского геотермального месторождения (Дальний Восток) // Геохимия. 2017. № 4. С. 372–380.
- 2. Потурай В.А. Органическое вещество в гидротермальных системах разных типов и обстановки // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 11. С. 6–16.
  - 3. Гидрогеология СССР. Т. 23. Хабаровский край и Амурская область. М.: Недра, 1971. 514 с.
- 4. Кулаков В.В. Геолого-структурные и геотермальные условия формирования термальных подземных вод Приамурья // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33, № 5. С. 66–79.
- 5. Чудаев О.В., Чудаева В.А., Брагин И.В. Геохимия термальных вод Сихотэ-Алиня // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 6. С. 73–81.
- 6. Sanchez-Avila J.I., Garcia-Sanchez B.E., Vara-Castro G.M., Kretzschmar T. Distribution and origin of organic compounds in the condensates from a Mexican high-temperature geothermal field // Geothermics. 2021. V. 89. 101980.
- 7. Soniassy R., Sandra P., Schlett C. Water analysis: Organic micropollutants. Germany, Hewlett-Packard Company, 1994. 278 p.
- 8. Украинцев А.В., Плюснин А.М. Алифатические углеводороды углекислых минеральных и азотных термальных вод Западного Забайкалья // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Мат-лы четвертой Всерос. конф. с международ. участием. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2020. С. 179–183.
- 9. Fekete J., Sajgó C., Kramarics Á., Eke Z., Kovács K., Kárpáti Z. Aquathermolysis of humic and fulvic acids: Simulation of organic matter maturation in hot thermal waters // Org. Geochem. 2012. V. 53. P. 109–118.
- 10. Сорохтин Н.О., Лобковский Л.И., Козлов Н.Е. Коромантийный цикл углерода и происхождение абиогенных углеводородов // Океанология. 2020. Т. 60, № 2. С. 281–292.
- 11. Компаниченко В.Н., Потурай В.А. Вариации состава органического вещества в водах Кульдурского геотермального месторождения // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34, № 4. С. 96–107.

#### АЛЛЮВИЙ НИЗКИХ ПОЙМ РЕЧНЫХ ДОЛИН БАССЕЙНА Р. СЕЛЕНГИ: СТРОЕНИЕ, ВОЗРАСТ ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-217-220

Рыжов Ю.В. <sup>1,2,3</sup>, Коломиец В.Л. <sup>4</sup>, Смирнов М.В. <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ryv@crust.irk.ru

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, smv@mail.ru

<sup>3</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск,ryzhovyurij@yandex.ru

<sup>4</sup>Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ

Аннотация. Представлены новые данные о строении и возрасте аллювия низких пойм рек в бассейне р. Селенги. Выполнены описания разрезов, получены данные о гранулометрическом и химическом составе речных осадков, абсолютном возрасте. Выявляются большие различия в строении и составе аллювия низкой поймы в зависимости от морфологии долин рек, расходов воды, структурно-тектонических условий бассейнов. Низкие поймы – активные формы рельефа, формирование которых началось в позднем голоцене (<4.2 тыс. кал. л.н.) и продолжается в настоящее время. Выделены хронологические этапы осадконакопления и почвообразования, определено время фаз высокой водности рек.

Ключевые слова: низкая пойма, аллювий, возраст, этапы формирования.

**Abstract.** New data on the structure and age of alluvium of low floodplains in the river basin are presented. Selenga. Descriptions of sections have been completed, data on the granulometric and chemical composition of river sediments, and absolute age have been obtained. There are large differences in the structure and composition of the alluvium of the low floodplain, depending on the morphology of river valleys, water flow rates, and structural-tectonic conditions of the basins. Low floodplains are active landforms, the formation of which began in the Late Holocene (<4.2 thousand cal BP) and continues at the present. Chronological stages of sedimentation and soil formation are distinguished, the time of the phases of high water discharges in rivers are determined.

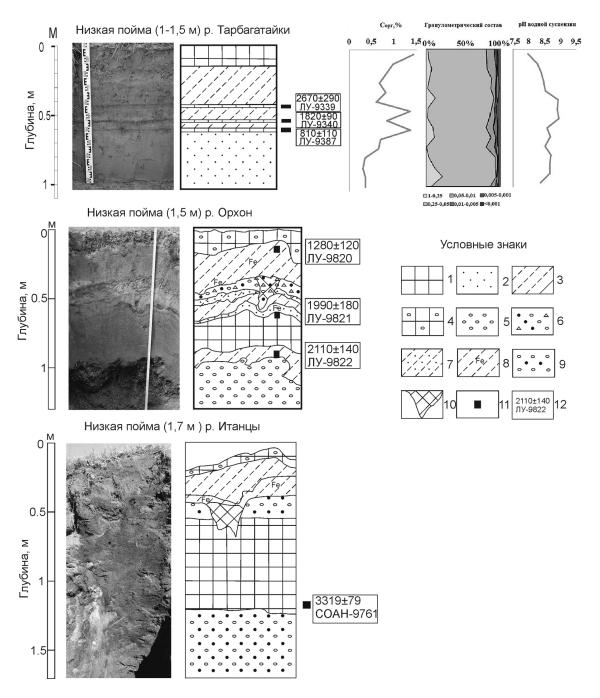
**Key words:** low floodplain, alluvium, age, stages of formation.

#### Введение

Аллювий является одним из важнейших генетических типов континентальных отложений [1, 2]. В речных долинах сосредоточены крупнейшие города России, с аллювием связаны многие полезные ископаемые. Отличительными особенностями речных осадков является хорошая сортированность, окатанность, горизонтальная и косая слоистость. Изучению речных осадков посвящено большое количество исследований [3-5]. Для Прибайкалья и Забайкалья информация о строении, составе, возрасте аллювия пойм представлена в публикациях [6-11]. Поймы рек повсеместно распространены в речных долинах в бассейне р. Селенги. Они имеют различную высоту (0.5-5.0 м), строение и возраст аллювия. На малых реках высота пойм не превышает 1-3 м, на крупных достигают 5 м. Отмечаются как выдержанность высотных отметок по долинам рек, так и существенные различия в разных частях долины. Ширина пойм изменяется от 1-10 м в горных районах на малых реках до нескольких километров в крупных речных долинах и котловинах. При исследовании разрезов пойм проводилось детальное описание, привязка высоты поймы к уровню водотоков, в полевых условиях, по картам, комическим снимкам высокого разрешения определялась ширина, отбирались пробы на гранулометрический химический состав, абсолютный возраст.

#### Результаты исследования

Изучено три разреза отложений низкой поймы (1–2 м) на правом берегу р. Тарбагатайка недалеко от. с. Бурнашево, на правом берегу р. Итанцы недалеко от н.п. Клочнево, на левом берегу р. Орхон у г. Хархорин (Каракорум) в Монголии. Реки характеризуются различным гидрологическим режимом и структурно-тектоническими условиями. Река Тарбагатайка протекает в Куйтунском межгорном понижении. Разрез низкой поймы р. Итанцы расположен в днище одноименной котловины. В предгорье хр. Хангай и верхнем течении р. Орхон находится третий изученный разрез. На рисунке представлено строение аллювия низкой поймы.



Строение и возраст отложений низкой поймы (1-2 м) рек в бассейне р. Селенги: I — современные и погребенные почвы; 2 — пески мелкозернистые; 3 — супеси; 4 — почвы с включением гальки; 5 — гравий с галькой; 6 — песок разнозернистый с включением дресвы и гравия; 7 — супеси с включением песка; 8 — супесь с пятнами, линзами и прослоями ожелезнения; 9 — песок разнозернистый с гравием и галькой; 10 — криогенные клинья; 11 — интервал отбора проб на  $^{14}$ С; 12 — календарный возраст и лабораторный номер образца.

Детально изучены строение и гранулометрический состав отложений низкой (1.0—1.5 м) поймы на правом березу р. Тарбагатайка (левый приток р. Куйтунка) недалеко от н.п. Бурнашево (51°27′03.2″ с.ш. 107°22′07.5″ в.д.). В отложениях низкой поймы р. Тарбататайка вскрыты четыре слоя аллювия. Сверху (0—16 см) залегают супеси пылеватые гумусированные с углями. Ниже (16—26 см) аллювий представлен супесями и песками мелко- и тонкозернистыми с включением средне-и крупнозернистых песков. На глубинах 26—63 см осадки состоят из чередования супесей, песков мелко- и тонкозернистых с включение среднезернистых и тонких гумусированных (1—3 см) прослоев супеси с углями.

Из этого слоя получены три радиоуглеродные датировки. Самая молодая радиоуглеродная датировка относится к нижнему гумусированному прослою. Вверх по разрезу происходит удревнение (инверсия) радиоуглеродных датировок. Мы считаем этот слой отложений результатом аккумуляции продуктов смыва и размыва почв с водосбора. Гумусированный прослой залегает непосредственно на кровле песчаного аллювия нижнего слоя осадков и отражает, по нашему мнению, реальное время ее формирования. В подошве разреза (63–103 см) залегают аллювиальные пески мелко- и тонкозернистые с включением средне- и крупнозернистых песков (63–93 см) и супеси (93–103 см).

Установлены следующие основные этапы формирования отложений:

- накопление серых и светло-коричневых песков и супесей с включением углей (63–103 см) >0.84 тыс. кал. л.н.;
- аккумуляция мелко- и среднезернистых аллювиальных песков и тонких прослоев гумусированной супеси (26–63 см) 0.84–0.34 тыс. кал. л.н.;
- накопление мелкозернистых песков и супесей с включением среднезернистых песков (16–26 см) 0.34–0.21 тыс. кал. л.н.;
- аккумуляция супесей пылеватых гумусированных с углями (0–16 см) <0.21 тыс. кал. л.н. Этот этап седиментации связан с современным почвообразованием и поступлением наносов со склонов в результате смыва и размыва почв при освоении земель под пашни русскими старообрядцами, появлением населенных пунктов Десятниково, Бурнашево, Тарбагатай.

В разрезе поймы высотой 1.5 м на правом берегу р. Итанцы (52°10'30.1" с.ш., 107°31'49.8" в.д.) выделяются пойменный (0–120 см) и русловой аллювий (120–150 см). Пойменные осадки представлены гумусированными супесями с мелкой галькой (0–10 см), супесями с пятнами ожелезнения (10–33 см), песком мелко- и среднезернистым с включением гравия (33–46 см), суглинками легкими оторфованными темно-коричневыми с бурым оттенком с криотурбациями в кровле слоя (46–75 см), оторфованными средними суглинками с многочисленными пятнами ожелезнения (75–120 см). Из подошвы суглинков с глубины 115–120 см получена радиоуглеродная датировка 3120±65 (СОАН-9761) лет (3319±79 кал. л.н.). Русловой аллювий представлен песками разнозернистыми с включением гравия и гальки. Отложения на глубинах 20–46 см криотурбированы. Выделяется клиновидная структура на глубинах 36–65 см шириной до 25 см, деформации слоев аллювия. Время криогенного растрескивания оценивается ~0.8–0.5 тыс. кал. л.н. и совпадает с Малым ледниковым периодом (МЛП).

Выделяются следующие этапы формирования отложений поймы:

- аккумуляция руслового аллювия (>3.4 тыс. кал. л.н.);
- накопление суглинков средних оторфованных (3.4–2.1 тыс. кал. л.н.) и оторфованных супесей (2.1–1.3 тыс. кал. л.н.);
  - аккумуляция песков с включением гравия (1.3–0.9 тыс. кал. л.н.);
- накопление супесей (0.9–0.3 тыс. кал. л.н.), криогенное растрескивание ( $\sim$ 0.8–0.5 тыс. кал. л.н.);
  - формирование современной почвы (<0.3 тыс. кал. л.н.).</li>

Изучен разрез низкой поймы высотой 1.5 м на левом берегу р. Орхон у г. Хархорин (Каракорум) в Монголии (47°24'06.8" с.ш., 102°51'51.0" в.д.). Аллювий представлен супесями гумусированными с включением мелкой гальки (0–12 см), супесями с пятнами ожелезнения (12–33 см), песками разнозернистыми с включением дресвы и гравия (33–39 см), супесями серыми белесоватыми с включением разнозернистого песка (39–44 см), супесями белесыми, ожелезненными в кровле слоя (44–51 см), песками тонкозернистыми ожелезненными (51–58 см), супесями гумусированными ожелезненными (58–81 см), супесями слабогумусированными сизыми оглеенными с пятнами ожелезнения (81–94 см), гравием и галькой (94–130 см). Горизонтальное залегание слоев нарушено криогенными деформациями. На глубинах 39–60 см выделяется клиновидная структура шириной до 14 см. Она выполнена песками разнозернистыми с включением дресвы и гравия до глубины 54 см,

супесями серыми и темно-серыми белесыми (54–56 см) и песками тонкозернистыми желтовато-коричневыми ожелезненными (56–60 см).

Выделяются следующие этапы аккумуляции отложений:

- накопление руслового аллювия (94–130 cm) >2.1 тыс. кал. л.н.;
- почвообразование (58–81 см) 2.1–1.95 тыс. кал. л.н.;
- аккумуляция тонкозернистых ожелезненных песков (51–58 см) 1.95–1.84 тыс. кал. л.н.;
  - накопление супесей серых белесых (44–51 см) 1.84–1.73 тыс. кал. л.н.;
- аккумуляция супесей серых белесоватых с включением разнозернистого песка (39–44 см) 1.73–1.65 тыс. кал. л.н.;
- накопление песков разнозернистых с включением дресвы и гравия (33–39 см) 1.65–1.55 тыс. кал. л.н., свидетельствующее об увеличении водности реки и высоких паводках;
- аккумуляция супесей слабогумусированных серых с пятнами ожелезнения (12–33 см) 1.55–1.0 тыс. кал. л.н.;
- накопление супесей гумусированных с включением гальки (0–12 см) в течение последних 1 тыс. лет.

Время формирования клиновидной криогенной структуры соответствует возрасту кровли супесей серых белесоватых с включением разнозернистого песка (1.65 тыс. кал. л.н.). Клин в основном выполнен и перекрыт песками разнозернистыми с включением дресвы и гравия возрастом 1.65–1.55 тыс. кал. л.н.

#### Заключение

Установлено, что отложения разрезов низких пойм имеют горизонтальное, волнистое, наклонное залегание (0.5–2.0 м), позднеголоценовый возраст (<4.2 тыс. кал. л.н.) и формируются в различных геодинамических условиях. Аккумуляция речных осадков происходила во время паводков. Отложения низких пойм представлены чередованием слоев аллювия русловой и пойменной фаций различной мощности и разного гранулометрического состава. При снижении высоты половодий и паводков накапливаются органогенные отложения (гумусированные супеси и суглинки, торфяники). В разрезах аллювия низких пойм выявляются криогенные деформации, связанные с похолоданиями климата в позднем голоцене.

Работа выполнена при поддержке  $P\Phi\Phi U$  (проект № 17-29-05064 офи м).

- 1. Шанцер Е.В. Аллювий равнинных рек умеренного пояса и его значение для познания закономерностей строения и формирования аллювиальных свит. М.: АН СССР, 1951. 275 с.
- 2. Лазаренко А.А. Литология аллювия равнинных рек гумидной зоны (на примере Днепра, Десны и Оки). М.: Наука, 1964. 236 с.
- 3. Николаев Н.И. О строении поймы и аллювиальных отложений // Вопросы теоретической и прикладной геологии. 1947. Сб. 2. С. 20–32.
- 4. Ламакин В.В. Динамические фазы речных долин и аллювиальных отложений // Землеведение. 1948. Т. 2 (42). С. 154–187.
- 5. Лаврушин Ю.А. Опыт сравнительной характеристики строения аллювия равнинных рек различных климатических зон // Современный и четвертичный континентальный литогенез. М.: Наука, 1966. С. 162–175.
- 6. Логачев Н.А., Ломоносова Т.К., Климанова В.М. Кайнозойские отложения Иркутского амфитеатра. М.: Наука, 1964. 196 с.
- 7. Базаров Д.-Д.Б. Четвертичные отложения и основные этапы развития рельефа Селенгинского среднегорья. Улан-Удэ: Бурятское книжное изд-во, 1968. 156 с.
- 8. Ендрихинский А.С. Последовательность основных геологических событий на территории Южной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене // Поздний плейстоцен и голоцен юга Восточной Сибири. К XI конгрессу INQUA в СССР. Новосибирск: Наука, 1982. С. 6–35.
- 9. Константинов М.В. Каменный век восточного региона Байкальской Азии. Улан-Удэ Чита, 1994. 180 с.
- 10. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. Кайнозой Байкальской рифтовой зоны: строение и геологическая история. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Фил. "Гео", 2001. 249 с.
  - 11. Карасев В.В. Кайнозой Забайкалья. Чита, 2002. 128 с.

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ В ВОДЕ ИСТОЧНИКА «РАДОНОВЫЙ» (ПИТКЯРАНТСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН, РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-221-224

Сидкина Е.С.  $^1$ , Конышев А.А.  $^1$ , Солдатова Е.А.  $^1$ , Торопов А.С.  $^2$ , Догадкин Д.Н.  $^1$ , Громяк И.Н.  $^1$ 

<sup>1</sup>Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, SidkinaES@yandex.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Аннотация. В ходе полевых исследований 2020 г. была отобрана природная вода из источника «Радоновый», расположенного в 3 км от г. Питкяранта. Химический состав воды был определен на современных приборах с использованием актуальных методик. Сравнение с ПДК для питьевых вод показало повышенные содержания железа, алюминия, марганца, никеля и кадмия. Природные воды источника выносят токсичные элементы из подземного горизонта на поверхность, где они могут осаждаться из воды или мигрировать в поверхностных водах. Основным фактором накопления железа в растворе является органическое вещество гуминовой природы, которое связывает железо в гидроксофульватный комплекс. Механизм накопления металлов в растворе, благодаря образованию органоминеральных комплексов, возможен и для других металлов при более высокой концентрации гуминовых веществ. Этот механизм, вероятно, будет проявлен при смешении вод радонового источника с поверхностными водами района.

**Ключевые слова:** термодинамический расчет, природные воды, фульвокислоты, гуминовые кислоты, железо.

Abstract. Natural water of a radon spring was sampled during field research in 2020. The spring is located 3 km from Pitkyaranta. The chemical composition of the spring water was analyzed on modern devices using up-to-date methods. Measured concentrations of iron, aluminum, manganese, nickel, and cadmium in radon spring water are higher comparing with limiting concentrations for drinking water. Spring waters carry out heavy metals from the underground horizon to the surface, where redeposition (precipitation of minerals from the water) or further migration in surface waters can occur. The main factor in the accumulation of iron in solution is humic substances that bind iron in a hydroxofulvate complex. Accumulation of metals in water solution due to the formation of organomineral complexes is also possible for other metals at a higher humic matter concentration. This mechanism is likely manifested when the radon spring waters mix with the surface waters.

Key words: thermodynamic calculation, natural water, fulvic acids, humic acids, iron.

На территории Республики Карелия широко развиты проявления радоновых вод. Они приурочены к зонам трещиноватости в интрузиях гранитоидов и к корам выветривания и распространены на глубинах преимущественно до 50–100 м [1]. Радоновые воды района являются аналогами радоновых вод липовского и кисегачского типа, используемых в Западной Сибири (санаторий «Кисегач», бальнеолечебница «Липовка») и на Украине (курорт «Хмельник»). Наиболее крупным проявлением радоновых вод в регионе является Кондокское месторождение, расположенное в 11 км от г. Костомукша. Также, по данным Министерства природопользования и экологии Республики Карелия, скважинами вскрыты проявления радоновых вод близ деревень Койкары, Карташи, Совдозеро, Кашканы, Песчаное [2].

В июне 2020 г. в ходе полевых работ был опробован источник «Радоновый», находящийся в 3 км от г. Питкяранта. В открытой литературе крайне мало информации об этом объекте, относящемся, вероятно, к группе скважин «Хопунваара» [3]. По данным [4], средняя концентрация радона в этих водах составляет 1739—6845 Бк/л.

Геологическое описание. Объект расположен на северо-восточном берегу Ладожского озера (рис. 1, *a*), в зоне непосредственной близости контакта гранитов Салминского батолита (мезопротерозой) с вмещающими породами. Под вмещающими породами кровля интрузивных пород полого погружается в сторону Ладожского озера, где вблизи его границ резко меняет наклон на субвертикальный. Мощность гранитных пород составляет до 3–4 км [5].

Вмещающие породы представлены куполами гнейсогранитов (AR<sub>2</sub>–PR<sub>1</sub>), окаймленных породами сортавальской серии – амфиболитами и амфиболовыми сланцами,

мраморами, выше которых залегают слюдистые сланцы Ладожской серии. Все вмещающие породы метаморфизованы.

В районе, по карбонатным горизонтам сортавальской серии развиты скарны с Fe-Sn-полиметаллической и редкометалльной минерализацией. Многие рудные тела отрабатывались в прошлом, главным образом в XIX в. и в самом начале XX в. В настоящий момент в Питкярантском рудном районе некоторые Sn и U объекты имеют промышленную ценность, но не разрабатываются.

Скважина, из которой происходит излияние вод источника «Радоновый», расположена вблизи исторического рудника «Клара II» (рис.  $1, \delta$ ). Кровля гранитов Салминского батолита в этом месте находится на глубине в первые десятки метров.

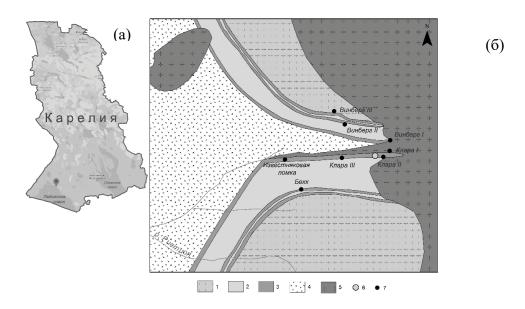


Рис. 1. Схема расположения источника «Радоновый» на карте Республики Карелия (a) и в пределах Хопунваарского рудного поля  $(\delta)$ : I — купола гнейсогранитов; 2 — амфиболиты и амфиболовые сланцы сортавальской серии; 3 — карбонатные горизонты сортавальской серии; 4 — слюдистые сланцы ладожской серии; 5 — гранитные породы Салминского батолита; 6 — источник «Радоновый»; 7 — горные выработки (по материалам [6]).

#### Методы исследований

При пробоотборе анализировались показатели рН (PH200, HM Digital, Южная Корея) и Еh (ЭКОТЕСТ 2000, ЭКОНИКС, Россия). Пробы для анализа микроэлементов на точке опробования фильтровали через ацетат-целлюлозные мембраны с размером пор 0.45 мкм в стерильные пробирки объемом 15 мл с добавлением 0.45 мл HNO<sub>3</sub> ос. ч. Для анализа компонентов карбонатной системы, хлорид-иона и  $C_{\rm opr}$  пробы отобраны в бутылки объемом 300 мл, предварительно трижды промытые исследуемой водой.

Элементный анализ воды был выполнен в ГЕОХИ РАН (г. Москва). Содержания Са, Mg, Na, K, Fe, Al, S определяли методом ICP-AES с помощью плазменного спектрометра iCAP 6500 DUO (Thermo Scientific), содержания Mn, Co, Ni, Zn, Sr, Pb, Cd, U и других микроэлементов определены методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре X-series 2 (Thermo Scientific). Концентрация  $SO_4^{2-}$  рассчитана из концентрации S.

Анализ компонентов карбонатной системы (CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub>-, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) и хлорид-иона выполнен методом потенциометрического титрования с использованием высокоточного анализатора Эксперт-001 (ООО Эконикс-Эксперт). Содержание Сорг определено методом высокотемпературного каталитического окисления (Vario TOC cube, Elementar). Соотношение содержаний проанализировано фульвогуминовых кислот оксидиметрически с K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> на приборе Shimadzu UV-1800 с преконцентрированием на смоле XAD-8 и разделением элюата при pH=2. Исследования выполнены в МГУ им. М.В. Ломоносова.

Химический состав воды из источника «Радоновый». По классификации [7] вода из источника является пресной, нейтральной (рН 7.41), холодной (4.8 °C). По химическому составу относится к гидрокарбонатно-сульфатному магниево-кальциевому типу.

В воде источника отмечены превышения относительно ПДК для питьевой воды по железу, алюминию, марганцу, никелю, кадмию (таблица).

Химический состав воды из источника «Радоновый»

Компонент	TDS	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Ca	l	Mg	Na	K	Fe		Al
Содержание, мг/л	147	4.22	46.4	67.3	1.0	15	.4	9.31	1.5	0.54	1.98	8	4.29
Компонент	Mn	Ni		Cu	Zn		Sr		Cd	Pb		U	
Содержание, мкг/л	264	126	50	159	3178		20	.16	28.15	0.62		2.	28

Примечание. Жирным выделены значения, превышающие предельно допустимые концентрации в питьевых водах по СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода; TDS – минерализация (total dissolved solids).

Формы нахождения химических элементов в воде источника «Радоновый». Термодинамические расчеты проведены с помощью программного комплекса HydroGeo [8]. Система состояла из O, H, C, S, Cl, Ca, Mg, Na, K, Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Ni, Sr, Cd, Pb, U, Fu (фульвокислота), Hu (гуминовая кислота).

Для расчета свободных энергий образования комплексов с фульвовыми и гуминовыми кислотами были использованы эффективные константы устойчивости, приведенные в [9]. Количество фульво- и гуминовых кислот было рассчитано из концентрации  $C_{\rm opr}$  (2.9 мг/л) согласно методу, изложенному в [10]. Более подробно методика термодинамических расчетов описана в [11].

Совместно с расчетом форм нахождения химических элементов в природной воде источника проведен расчет насыщения относительно различных минералов. Моделирование выпадения минералов из раствора показало, что из воды при заданных условиях выпадают гиббсит, доломит, гетит,  $Fe(OH)_3$ , тенорит, цинкит, родохрозит, пирит, сфалерит. Среди вышеперечисленных минералов в наибольшем количестве выпадает гиббсит (12 мг из 1 кг раствора). Другие минералы находятся на грани равновесия и осаждаются в незначительном количестве ( $7.5 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-5}$  мг из 1 кг раствора).

На рис. 2 показаны основные формы (не менее 0.01 %) нахождения химических элементов заданной системы. Основной формой нахождения кальция, магния, натрия и калия является ионная. Небольшая доля приходится на гидрокарбонатную и сульфатную форму. Все оставшееся в растворе железо входит в гидроксофульватный комплекс, который связывает практически всю фульвокислоту, заданную в баланс системы. Фульватные комплексы с другими металлами были учтены в модели, но их содержания при расчете оказались малы.

Распределение по формам стронция и никеля в целом повторяет распределение основных катионов. Отличием является более высокое содержание NiHCO<sub>3</sub><sup>+</sup> и SrSO<sub>4</sub>, аq. Медь, марганец, цинк и кадмий также находятся преимущественно в ионной форме. Другими формами для этих элементов является сульфатная, гидрокарбонатная и гуминовая. Доминирующей формой нахождения алюминия является Al(OH)<sub>3</sub>, aq. На втором месте – Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup>. Для свинца преобладающие формы – PbOH<sup>+</sup> (51 %) и Pb<sup>2+</sup> (36 %). Растворенный уран распределяется в основном по следующим формам: UO<sub>3</sub>, aq (58 %), UO<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, aq (19 %), UO<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub><sup>2-</sup> (11 %).

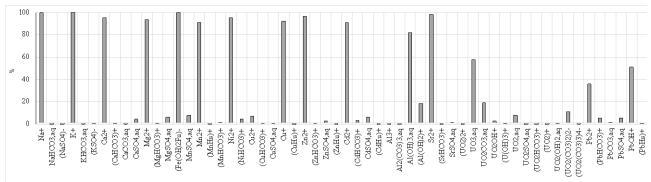


Рис. 2. Формы нахождения химических элементов в воде источника «Радоновый» (показаны формы, содержание которых превышает 0.1 %).

#### Выводы

Проведенные аналитические исследования и сравнение с ПДК для питьевых вод показали, что вода источника «Радоновый» содержит концентрации железа, алюминия, никеля, марганца и кадмия, превышающие значения, установленные СанПиН 2.1.4.1074-01 питьевых вод. Основной формой нахождения железа воде гидроксофульватная, остальные рассмотренные металлы находятся преимущественно в ионной форме. Органическое вещество является основным фактором накопления железа в растворе. Согласно [12] при низком содержании фульвокислоты железо выпадает из раствора в виде гидроокиси, что и демонстрируют наши расчеты. Кроме гидроокиси железа, по результатам моделирования из раствора выпадают минералы алюминия, железа, цинка, меди, марганца. Механизм накопления металлов в растворе благодаря образованию органоминеральных комплексов возможен и для других металлов при более высокой концентрации органического вещества. Такая ситуация возможна при смещении вод источника с поверхностными водами района.

- 1. Максимов А.В., Богданов Ю.Б., Воинова О.А., Коссовая О.Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Р-(35),36 Петрозаводск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 400 с.
- 2. Карелия. Минеральные воды. Лечебные грязи. URL http://nedrark.karelia.ru/mnia/minvoda\_karelia.htm (дата обращения 31.01.2021).
- 3. Куликов Г.В., Жевлаков А.В., Бондаренко С.С. Минеральные лечебные воды СССР. М.: Недра, 1991. 399 с.
- 4. Мелентьев Г.Б. Местные ресурсы, техноэкологические инновации и предпринимательство как средства интенсификации природопользования и социально-экологической реабилитации территорий // Экология промышленного производства. 2007. № 4. С. 62–71.
- 5. Larin A.M. Ore mineralization // Salmi Batholith and Pitkäranta ore field in Soviet Karelia. Espoo, 1991. P. 19–34.
- 6. Булах А.Г., Франк-Каменецкий В.А. Геологическая экскурсия в окрестности Питкяранты. Петрозаводск : Госиздат Карел. АССР, 1961. 107 с.
  - 7. ОСТ 41-05-263-86 Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре.
- 8. Букаты М.Б. Рекламно-техническое описание программного комплекса HydroGeo. Номер гос. регистрации алгоритмов и программ во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНТИЦ) № 50200500605. М.: ВНТИЦ, 2005. 7 с.
- 9. Soldatova E.A., Sidkina E.S., Sun Z. Thermodynamic modeling of aqueous migration of chemical elements in irrigation water // E3S Web of Conferences, 2020. V. 222. 05022.
- 10. Крайнов С.Р., Шваров Ю.В., Гричук Д.В., Добровольский Е.В., Соломин Г.А., Борисов М.В., Рыженко Б.Н., Матвеева Л.И., Лялько В.И., Швец В.М. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии. М.: Недра, 1988. 254 с.
- 11. Конышев А.А., Сидкина Е.С., Солдатова Е.А., Догадкин Д.Н., Громяк И.Н. Особенности поведения химических элементов в системе вода порода района разрабатываемого карьера бутового камня в Питкярантском рудном районе (Карелия) // Известия ТПУ. 2021. Т. 332, № 3 (принята в печать).
- 12. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод: теоретические, прикладные и экологические аспекты. Изд. 2, доп. 2012. 672 с.

#### ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КАРЬЕРА БОРОК (г. НОВОСИБИРСК)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-225-229

Сухорукова А.Ф.<sup>1</sup>, Черкасов А.А.<sup>2</sup>, Новиков Д.А.<sup>1</sup>, Максимова А.А.<sup>1</sup>, Деркачев А.С.<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>OOO «Горнодобывающая компания», Новосибирск, Borok16@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены гидрогеологические условия и геохимические особенности дренажных вод гранитного карьера Борок, старейшего из эксплуатирующихся в настоящее время в России. Установлено, что воды преимущественно Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na-Mg-Ca и SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na-Mg-Ca состава с величиной общей минерализации 572–697 мг/дм<sup>3</sup>, отвечают условиям окислительной геохимической обстановки. Гидрогеологическое строение карьера достаточно сложное, и его эксплуатация без постоянной откачки поступающих вод (2.24–2.35 млн м<sup>3</sup> в год) может привести к его полному затоплению через восемь лет. Впервые дана оценка роли трещинно-жильных вод палеозойских гранитов, четвертичного водоносного горизонта и атмосферных осадков в обводнении карьера в течение года.

**Ключевые слова**: гидрогеологические условия, водопритоки, естественные радионуклиды, гранитный карьер Борок, город Новосибирск.

**Abstract.** Hydrogeological conditions and geochemical features of draining waters of the Borok granite quarry, the oldest of those under development currently in Russia, are considered in the work. It is established that water composition is mainly Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na-Mg-Ca and SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na-Mg-Ca with TDS 572 - 697 mg/L, corresponding to the conditions of the oxidative geochemical setting. The hydrogeological structure of the pit is rather complicated, and its development is impossible without permanent exhaustion of water entering it  $(2.24 - 2.35 \text{ mln m}^3 \text{ per year})$ , which may lead to its complete flooding within eight years. An expert assessment of the role of fissure—vein waters of Paleozoic granites, Quaternary aquifers and atmospheric precipitation in quarry inundation over the year is presented for the first time.

*Key words:* hydrogeological settings, water inflow, natural radionuclides, the Borok granite quarry, Novosibirsk city.

Среди множества проблем при разработке месторождений полезных ископаемых открытым (карьерным) способом ключевой является проблема прогноза водопритоков в выработки. Применительно к Новосибирской городской агломерации существует еще одна — это повышенный естественный фон содержания радионуклидов (радона, урана и тория) в подземных водах одноименного гранитоидного массива [1–12]. В этой связи нами впервые были выполнены комплексные геохимические исследования природных вод разрабатываемого карьера строительного камня Борок и выявлены особенности сезонности водопритоков в карьер.

Карьер Борок расположен в южной части Октябрьского района г. Новосибирска на правом берегу р. Иня, в 500 м выше ее устья (рис. 1). Карьер заложен в холме древнего острова р. Обь с сосновым бором в 1908 г. в связи с активным развитием города (тогда еще Новониколаевска) и строительством Транссибирской железнодорожной магистрали, хотя кустарная разработка гранитов началась еще в конце XIX в. Балансовые запасы месторождения в настоящее время оцениваются в 3000 м<sup>3</sup>. Продукция карьера сертифицирована для производства строительных работ и декларирована для дорожного строительства. За всю историю его эксплуатации добыто более 40 млн т каменного материала.

В рамках настоящих исследований были обобщены материалы ООО «Горнодобывающая компания» по водопритокам в карьер Борок и составлена электронная база данных общим объемом более 1500 записей, отобраны и проанализированы 16 проб воды в 2019–2020 гг. Лабораторное изучение их химического состава проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Данные по количеству атмосферных осадков и среднесуточной температуре за анализируемый период были взяты с информационного портала «Погода и климат» [13].

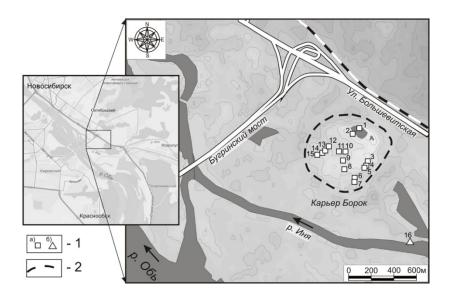


Рис. 1. Местоположение карьера Борок и изученных объектов. 1 — воды: а — техногеннонарушенных гранитов карьера (№ 1–15), б — поверхностные реки Иня (№ 16); 2 — границы карьера Борок.

Месторождение приурочено к юго-восточному контакту Новосибирского верхнепалеозойского массива гранитоидов ( $\epsilon v P_3 - T_1 p_2$ ) с песчано-глинистыми сланцами пачинской свиты верхнего девона ( $D_3 p c$ ), которые в результате контактового метаморфизма превращены в роговики. Гранитоиды и роговики пронизаны многочисленными дайками кислого состава, реже – дайками лампрофиров. Палеозойские породы до начала эксплуатации месторождения практически на всей площади были перекрыты осадками четвертичного возраста первой надпойменной и пойменной террас рек Обь и Иня мощностью до 5–12 м.

В процессе разведки и эксплуатации месторождения гидрогеологические исследования проводились в крайне малом объеме: оценка фильтрационных свойств пород, расчет водопритоков в карьер, единичные исследования химического состава воды. Первая гидрогеологическая характеристика месторождения была дана в 1955 г. Г.В. Баландиным, дальнейшие исследования карьера Борок в 70–80-х годах прошлого века связаны с именами геологов и гидрогеологов Новосибирской геологопоисковой экспедиции (А.В. Павлов, В.И. Грязнова, Г.Т. Голодняк, В.Н. Лукьяшко, Л.Е. Ударцева, Г.Ф. Вавилихин и другие).

В пределах территории карьера выделяется водоносный горизонт аллювиальных четвертичных отложений, представлен супесями, суглинками и песчано-гравийногалечниковыми отложениями. Режим грунтовых аллювиальных вод находится в прямой зависимости от режима рек Иня и Обь и количества выпадающих атмосферных осадков. По результатам опытных работ удельные дебиты скважин составляют 0.1–0.6 л/с, при среднем коэффициенте фильтрации 4.8 м/сут и средней водопроводимости 47.0 м²/сут. Водоносный горизонт палеозойских интрузивов представлен в основном гранитами, в меньшем объеме – аплитами, гранит-порфиритами, роговиками. Воды трещинно-жильные, напорные. По результатам опытных откачек палеозойские образования характеризуются невысокой водообильностью со средним удельным дебитом скважин 0.02 л/с. Средние величины коэффициента фильтрации составляют 1.4 м/сут, а коэффициента водопроводимости – не более 1 м²/сут. Питание осуществляется посредством межпластовых перетоков из вышезалегающего четвертичного горизонта, атмосферными осадками и дренажом из реки Иня.

В настоящей работе рассматриваются геохимические особенности вод, разгружающихся в карьере, на основе общепринятых в геохимии коэффициентов (Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, Ca/Na, Ca/Mg, rNa/rCl и SO<sub>4</sub>/Cl). В районе исследований установлены две

геохимические группы: воды техногенно-нарушенных гранитов и поверхностные (воды реки Иня).

Первая отличается большим разнообразием химического состава вод с преобладанием Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na-Mg-Ca и SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na-Mg-Ca типов с величиной общей минерализации от 572 до 697 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния от 0.89 до 10.53 мг/дм<sup>3</sup>. Параметры среды отвечают окислительной геохимической обстановке с величинами рН от 7.6 до 8.5; Еһ от +150.2 до +261.0 мВ и  $O_{2pactb.}$  от 3.4 до 11.4 мг/дм<sup>3</sup>. Средние значения геохимических коэффициентов составляют: Ca/Si 21.59; Mg/Si 4.92; Na/Si 8.84; Si/Na 0.16; Ca/Na 2.36; Ca/Mg 4.43; rNa/rCl 3.14 и SO<sub>4</sub>/Cl 4.00, что указывает на циркуляцию вод в алюмосиликатных породах с повышенной ролью в составе кальция и магния. Также следует отметить ряд объектов, в которых проявлены процессы окисления сульфидов (отношение SO<sub>4</sub>/Cl составляет до 11.51). Вторая геохимическая группа характеризуется SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Mg-Ca-Na составом с величиной общей минерализации 576 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния 1.94 мг/дм<sup>3</sup>. Параметры среды отвечают окислительной обстановке с величинами pH 8.6; Eh +165.6 мВ и O<sub>2 раств.</sub> 7.6 мг/дм<sup>3</sup>. Значения геохимических коэффициентов закономерно возрастают: Ca/Si 26.27; Mg/Si 9.42; Na/Si 40.52 и rNa/rCl 6.56, и снижаются: Si/Na 0.02; Ca/Na 0.65; Ca/Mg 2.79; SO<sub>4</sub>/Cl 2.61, что свидетельствует об активном накоплении в водах натрия (до  $78.7 \text{ мг/дм}^3$ ) за счет процессов антропогенного влияния в черте города.

Содержания радионуклидов в карьерных водах составляют (мг/дм³):  $^{238}$ U от  $9.30\cdot10^{-3}$  до 0.21 и  $^{232}$ Th от  $1.00\cdot10^{-6}$  до  $9.62\cdot10^{-5}$ .  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в водах изменяется в интервале от  $9.71\cdot10^{-5}$  до  $1.49\cdot10^{-3}$ , при среднем  $5.07\cdot10^{-4}$ . Активность радона варьируется в широких пределах от 1 до 89 Бк/дм³. При выполненных в 70–80-е годы прошлого века единичных замерах концентрация радона в водах четвертичных отложений не превышала 10–15, а в трещинно-жильных водах верхнепалеозойских гранитов варьировалась в диапазоне от 30 до 140 Бк/дм³. При этом содержание  $^{238}$ U составляло  $1.80\cdot10^{-4}$ – $7.8\cdot10^{-3}$  мг/дм³ в водах четвертичных отложений и  $9.30\cdot10^{-3}$ –0.21 мг/дм³ в трещинно-жильных водах гранитоидов. Данные по распределению тория получены впервые.

За более чем 100-летнюю эксплуатацию карьера его площадь и глубина существенно увеличились, что привело к значительному изменению гидрогеологических условий месторождения. Если в начале прошлого века месторождение представляло собой останец, возвышающийся над окружающей поверхностью, то в настоящее время это карьер глубиной более 80 м (абсолютная отметка дна рабочей зоны +10 м). Также значительно увеличилась площадь карьера (более чем в 10 раз): если в 1954 г. она составляла около 27300 м² при глубине карьера 22 м, то в 2020 г. уже 345000 м². В настоящее время старый карьер используется как водосборник, из которого ведется откачка и сброс дренажных вод в искусственно образованный ручей, впадающий в р. Иня. В связи с необходимостью увеличения добычи каменного материала в 1988 г. русло р. Иня было перенаправлено (500 м на юго-запад) в протоку Курья, что существенно изменило гидрогеологическую обстановку в зоне активного водообмена. До отвода русла р. Иня рассчитанные притоки в карьер были выше в 2.0–2.5 раза по сравнению с фактическими притоками. Этот факт свидетельствует об уменьшении доли вод аллювиального водоносного горизонта в общем водопритоке в настоящее время.

С первых лет эксплуатации карьера существует необходимость постоянных откачек воды, в послевоенном 1947 г. работа карьера была приостановлена, и карьер был полностью затоплен. Гидрогеологические условия карьера Борок достаточно сложные; согласно геологическому строению участка можно выделить два водоносных горизонта: аллювиальных отложений четвертичного возраста и палеозойских гранитов, питание которых определяется дренажом из р. Иня и количеством атмосферных осадков. Главным фактором, определяющим основные черты режима подземных вод на месторождении, является гидрологический режим, свойственный р. Иня.

По данным И.В. Фёклина, длительная эксплуатация карьера привела к формированию депрессионной воронки с радиусом влияния не менее 3200 м, деформированной в

восточном-северо-восточном направлении (в противоположную от рек Иня и Обь сторону). Как показывают результаты мониторинговых наблюдений, значительных изменений в существующем режиме вод, связанных с четвертичными отложениями и породами палеозоя, при дальнейшей эксплуатации карьера не ожидается. В настоящее время объем карьера оценивается в 17.7 млн м³. При среднегодовом водопритоке в размере 2.3 млн м³ карьер без постоянных откачек полностью заполнится водой приблизительно за восемь лет. Основной водоотлив в карьере организован на горизонте с абсолютной отметкой +50.0 м — главный водоем находится в северной части отработки, сбор поверхностных и подземных вод в который происходит по водоотводным канавам. Для откачки воды из главного водоема организован водоотлив с использованием трех насосных установок типа 300Д70 производительностью 1080 м³/час и автоматическая система учета.

Начиная с 50-х гг. прошлого века предпринимались попытки оценить объемы вод, поступающих в карьер, и роль поверхностного и подземного стока. Реальный учет откачиваемых объемов воды не велся вплоть до 2019 г. (рис. 2), поэтому анализ рассчитанных объемов вод, учитываемых в прошлые годы при эксплуатации месторождения, показал значительное завышение этих величин по сравнению с реальными в 1.5–2.0 раза. Особенно сильно завышение прослеживалось в летние месяцы. Автоматический учет водопритоков 2019–2020 гг. показал, что реальные цифры варьируются в объеме 2.24–2.35 млн м<sup>3</sup> в гол.

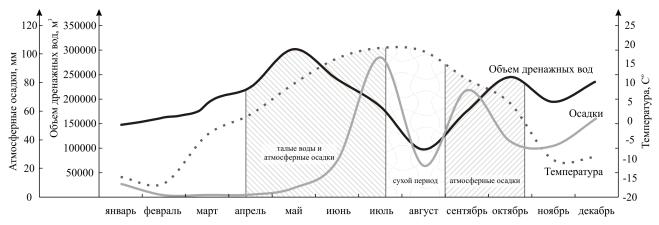


Рис. 2. Объемы дренажных вод карьера Борок в соответствии с количеством атмосферных осадков и среднесуточной температурой в 2019 г.

Кроме общей характеристики гидрогеологических условий карьера Борок, в период с 1950-х по 1980-е гг. предпринимались попытки оценить роль трещинно-жильных вод палеозойских гранитов, четвертичного водоносного горизонта и атмосферных осадков вод в общем объеме дренажных вод в карьер. Приток за счет атмосферных осадков оценивался как поверхностный сток при сформированной водосборной площади и среднегодовом количестве осадков. При этом четких критериев по разделению объемов притока не было разработано.

Принимая во внимание современные материалы по объемам водопритоков в карьер, можно выполнить вероятностную оценку доли трещинно-жильных вод в его обводнении. В холодный период года (ноябрь – март) водоприток в карьер за счет атмосферных осадков в виде дождя отсутствовал (рис. 2), а инфильтрация из водоносного горизонта аллювиальных четвертичных отложений была минимальной. Средний водоприток в это время составлял около 5100 м³/сут, и его можно считать поступающим из трещиноватых палеозойских пород. С мая по октябрь объемы дренажных вод увеличились до 6400 м³/сут, и разницу (в среднем 1300 м³/сут) можно отнести к вкладу атмосферных осадков и вод четвертичных отложений.

В заключение необходимо отметить, что впервые за более чем вековую историю разработки карьера Борок проанализированы гидрогеологические условия и получены актуальные сведения о геохимии дренажных вод. Произошло их существенное изменение за счет переноса русла реки Иня и снижение доли вод аллювиального водоносного горизонта и

дренажа из самой реки в общем обводнении карьера. Как показал опыт прошлых лет, эксплуатация карьера без постоянной откачки поступающих вод невозможна. Установлено, что основной объем воды, поступающей в карьер, относится к трещинно-жильным водам палеозойских гранитов, при этом их питание происходит за счет аллювиальных вод и вод атмосферных осадков, что определяет их разнообразие по химическому составу. Превалируют воды Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na-Mg-Ca и SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na-Mg-Ca состава с величиной общей минерализации от 572 до 697 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния от 0.89 до 10.53 мг/дм<sup>3</sup>. Параметры среды отвечают окислительной геохимической обстановке с величинами рН от 7.6 до 8.5, Eh от +150.2 до +261.0 мВ и  $O_{2pactrb.}$  от 3.4 до 11.4 мг/дм<sup>3</sup>. Максимальные содержания природных радионуклидов составляют: урана до 0.21 мг/дм<sup>3</sup>, тория до 9.62·10<sup>-5</sup> мг/дм<sup>3</sup>, а активность радона варьируется в интервале от 1 до 89 Бк/дм<sup>3</sup>. Невысокие концентрации  $^{222}$ Rn в водах следует связывать с местонахождением карьера Борок в зоне контакта Новосибирского гранитоидного массива с песчано-глинистыми сланцами.

Исследования проводились при поддержке проекта  $\Phi H U N 20331$ -2019-0025,  $P \Phi \Phi U$  и правительства Новосибирской области в рамках научного проекта N 20-45-540004.

- 1. Вериго Е.К., Быкова В.В., Гусев В.К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. 1979, вып. 14. С. 47–51.
- 2. Гусев В.К., Вериго Е.К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека. 1984. С. 99–107.
- 3. Росляков Н.А., Жмодик С.М., Пахомов В.Г. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. С. 461–464.
- 4. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 4. С. 1255–1274.
- 5. Новиков Д.А., Деркачев А.С., Сухорукова А.Ф. Гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2019. Т. 2, № 1. С. 125–132.
- 6. Максимова А.А., Деркачев А.С. Геохимия минеральных радоновых вод месторождения "Горводолечебница" (г. Новосибирск) // Трофимуковские чтения-2019: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции с участием иностранных ученых (Новосибирск, 7–12 октября 2019 г.). Новосибирск, 2019. С. 156–158.
- 7. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1451. article 012007.
- 8. Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in Radon Waters of The Zaelsovsky field (The Southern Part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1172, № 1, Article 012096.
- 9. Корнеева Т.В., Новиков Д.А. Формы миграции химических элементов в радоновых водах месторождения "Горводолечебница" (г. Новосибирск) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. № 17. С. 287–291.
- 10. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Сухорукова А.Ф., Максимова А.А., Черных А.В., Деркачев А.С. Радионуклиды в природных водах Новосибирской городской агломерации // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием (г. Улан-Удэ, 17–20 августа 2020 г.). Новосибирск, 2020. С. 134–138.
- 11. Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф. Геохимия системы вода порода проявления слаборадоновых вод "Инские источники" (юг Западной Сибири) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием (г. Улан-Удэ, 17-20 августа 2020 г.). Новосибирск, 2020. С. 88–92.
- 12. Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Сухорукова А.Ф. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований природных вод Новосибирской городской агломерации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Материалы XVI международной научной конференции (г. Новосибирск, 20–24 апреля 2020 г.). Новосибирск, 2020. С. 179–194.
  - 13. http://www.pogodaiklimat.ru/ дата обращения 2020.12.15.

# ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АНОМАЛИИ В УГЛЕНОСНЫХ СТРУКТУРАХ ЮГА ПРИМОРЬЯ: ИСТОЧНИКИ И ФОРМЫ НАКОПЛЕНИЯ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ (НА ПРИМЕРЕ РАКОВСКОЙ ВПАДИНЫ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-230-234

Тарасенко И.А.<sup>1,2</sup>, Зиньков А.В.<sup>2</sup>, Попов Н.Ю.<sup>1</sup>, Нагорнова Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, tarasenko\_irina@mail.ru

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, zinkov a@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность влияния палеозойских гранитов на наличие в углях Раковской впадины редких металлов. Выполнено моделирование процесса растворения и переноса металлов в системе «вода – гранит». Рассчитаны равновесные формы миграции элементов, их физико-химические параметры. Показано, что миграционная способность элементов в воде и масштабы их накопления в углях и в коре выветривания гранитов определяются гидрохимическими условиями и зависят от времени взаимодействия воды с горной породой. Результаты моделирования свидетельствуют в пользу того, что рассматриваемые лейкократовые граниты докайнозойского фундамента могли являться источником металлов, концентрируемых в углях Раковской впадины.

**Ключевые слова:** угли, металлы, физико-химическое моделирование, система «вода – гранит».

Abstract. The possibility of the influence of Paleozoic granites on the presence of rare metals in the coals of the Rakovskaya depression is considered. The process of metal dissolution and transfer in the "water-granite" system is modeled. The equilibrium forms of element migration and their physicochemical parameters are calculated. It is shown that the migration capacity of elements in water and the extent of their accumulation in coals and in the weathering crust of granites are determined by hydrochemical conditions and depend on the time of interaction of water with rock. The simulation results suggest that the considered leucocratic granites of the Pre-Cenozoic basement could be a source of metals concentrated in the coals of the Rakovskaya depression.

Key words: coals, metals, physical and chemical modeling, "water-granite" system.

#### Введение

Раковская угленосная впадина площадью 70 км<sup>2</sup> расположена на южной окраине Приханкайской низменности Приморского края. В отложениях впадины, помимо собственно буроугольного месторождения, отмечены высокие концентрации урана, германия, редкоземельных элементов, вольфрама, бериллия, галлия, мышьяка и ряда других редких металлов [1–4].

Временем формирования угленосных отложений впадины считается эоцен — олигоцен [5]. Фундамент впадины сложен магматическими образованиями преимущественно кислого состава и в меньшей степени метаморфическими породами, интенсивно дислоцирован, с мощной корой выветривания. Угленосные формации относятся к платформенному типу (формирование угленосных отложений происходило в период активизации платформ) и несут все его признаки [1, 2]. В геолого-тектоническом плане Раковская впадина приурочена к Уссурийскому разлому в пределах Уссурийско-Вознесенской редкометалльнофлюоритовой и марганцево-железорудной минерагенической зоны Ханкайско-Буреинской минерагенической провинции. Тектоника впадины характеризуется слабым проявлением складчатых деформаций (углы падения пород и пластов угля редко превышают 20°) и активным проявлением разрывных дислокаций сбросового и сбросо-сдвигового типа с вертикальными амплитудами от десятков до первых сотен метров и горизонтальными — от первых метров до первых километров.

Рядом исследователей [6, 7 и др.] отмечалась рудоконтролирующая роль разрывных нарушений. Однако в последнее время обозначилась и получает все большее подтверждение альтернативная точка зрения о гидрогенном генезисе минерализации углей Раковской впадины, связанном с гранитами докайнозойского фундамента, обрамляющими впадину [8, 9].

Палеозойские (позднепермские) граниты обрамления Раковской впадины характеризуются низким содержанием CaO (0.14 %), повышенным  $K_2O$  (4.38 %), а также

высокими, относительно среднего состава верхней континентальной коры, концентрациями таких элементов, как Be, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Y, Nb, Sn, Sb, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Tl, Pb, Th и U (рис. 1).

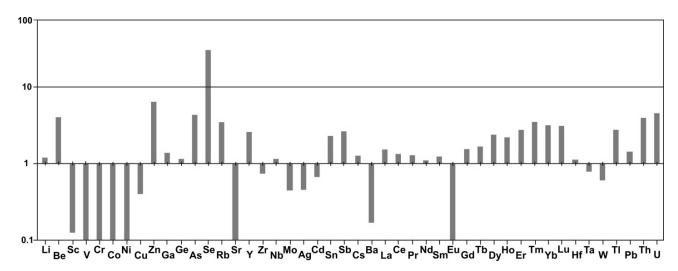


Рис. 1. Среднее содержание элементов-примесей в гранитах обрамления Раковской впадины, нормализованное к составу верхней континентальной коры [10].

Механизм формирования металлоносных углей в Раковской впадине до конца не ясен. В то же время близкий характер распределения РЗЭ в золе угля и гранитах обрамления Раковской впадины (рис. 2) позволяет предполагать, что неорганическое вещество углей было транспортировано из рассматриваемых гранитов, которые на протяжении мезозоя и раннего кайнозоя подвергались выветриванию.

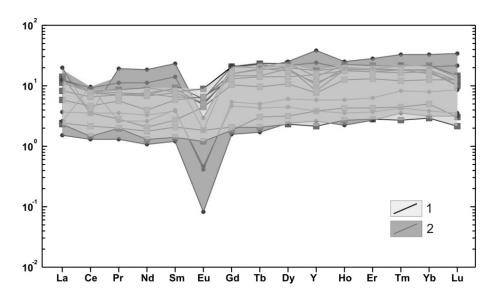


Рис. 2. Спектры распределения РЗЭ и Y, нормализованные к среднему составу верхней континентальной коры [10]: I – зола углей Раковской впадины; 2 – граниты обрамления.

В предлагаемой работе вероятность гипотезы формирования рудной минерализации в углях в результате процессов разрушения породообразующих минералов гранитов в зоне гипергенеза и извлечения элементов метеорными водами рассматривается с позиции физико-химического моделирования, которое ранее уже применялось авторами при изучении закономерностей формирования состава подземных вод в районах ликвидированных угольных шахт [11, 12].

#### Методика исследования

Эффективность физико-химических имитационных экспериментов обусловлена комплексом взаимосвязанных задач, решаемых для сложных гетерогенных мультисистем с участием водных растворов, твердых минеральных фаз и газовой смеси, и возможностями программного продукта Селектор-С (Windows) [13], реализующего подход выпуклого программирования к вычислению равновесия в гетерогенных системах минимизацией изобарно-изотермического потенциала (потенциала Гиббса).

При моделировании системы «вода – гранит» вводился природный химический состав лейкократового гранита докайнозойского фундамента, пересчитанный на количество молей каждого компонента. В реакцию с породой вводили чистую дождевую воду, термодинамически равновесную с атмосферой, при  $T=25\,^{\circ}\mathrm{C}$ .

Система «вода — гранит» охарактеризована матрицей из 59 независимых компонентов (C, N, Al, Fe, Si, Be, Cd, Sc, As, Ga, Ge, Rb, Sr, Hf, Pb, W, Ag, Sn, Eu, Gd, Nd, Sm, K, Li, Lu, P, Y, Yb, Ca, Na, Mg, Mn, Co, Cr, Ni, V, Ba, Cu, Pr, Zn, Cs, Mo, Nb, Zr, Sb, Ce, La, Th, U, Dy, Er, Ho, Se, Tl, Tb, Tm, S, H, O). Список веществ, потенциально возможных в равновесии, включал 503 зависимых компонента, в числе которых 27 минеральных фаз и 15 компонентов газовой фазы. Использованы термодинамические свойства минералов, газов и компонентов водного раствора, представленные в следующих адаптированных к Селектор-С (Windows), базах данных: a\_Shock [14–16], g\_Reid [17], s\_dump, s\_Robie Hemingway [18], s\_Yokokawa [19].

При определении вероятного состава потока исходили из предположения, что состав вод находится в условиях термодинамического равновесия с вмещающими породами, а величина соотношения масс породы и воды (Т/Ж) имеет смысл времени взаимодействия (условно, времени водообмена) породы и водного раствора [20].

#### Результаты исследования и их обсуждение

В зоне гипергенеза породообразующие минералы неустойчивы, поэтому с самого начала взаимодействия с водой они интенсивно растворяются. Вследствие симуляции растворения все больших и больших порций исходных пород в моделируемой системе «вода – гранит» отчетливо наблюдалась тенденция увеличения минерализации водного раствора (131.76 мг/кг $H_2O \rightarrow 47548.5$  мг/кг $H_2O$ ), а также последовательное изменение pH от 6.3 до 8.8, закономерная и направленная трансформация состава водной фазы. При этом происходило формирование гидрокарбонатных калиево-натриевых вод при минимальном количестве кальция. С каждым шагом (увеличением соотношения масс T/Ж), имитирующим проточный инфильтрационный поток метеорного происхождения, наблюдался последовательный рост содержаний элементов и вариации их форм миграции.

Анализ результатов моделирования системы «вода – гранит» обнаружил весьма широкий комплекс редких и других элементов в водах, обусловленный химическим составом гранита. На основании рассмотрения их физико-химических параметров – ионного потенциала и электроотрицательности [21] – выделены элементы, образующие в водах свободные преимущественно простые катионы (ионный потенциал электроотрицательность <600 кДж/моль): Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Rb<sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Sr<sup>+2</sup>, Ba<sup>+2</sup>, Pb<sup>+2</sup>, которые при концентрировании раствора могут интенсивно накапливаться в жидкой фазе. Они способны хорошо мигрировать и избирательно образовывать хорошо растворимые соединения с анионами вод. При отсутствии достаточных концентраций аддендов в водах эти элементы, будучи типичными элементами-гидролизатами, могут образовывать гидроксильные соединения, а при увеличении концентраций аддендов – вытеснять ионы ОН из координационной сферы элементов.

Определены элементы-комплексообразователи (ионный потенциал 2–10, электроотрицательность 600-1100 кДж/моль), которые в значимых количествах присутствуют в моделируемой системе:  $Mg^{+2}$ ,  $Y^{+3}$ ,  $Zn^{+2}$ ,  $Th^{+4}$ ,  $Co^{+2}$ ,  $Nd^{+3}$ ,  $Ni^{+2}$ ,  $BeOH^+$ , TlOH,  $YOH^{+2}$ ,  $ZnOH^+$ ,  $NiOH^+$ ,  $PbOH^+$ ,  $PbOH^+$ ,  $LaCO_3^+$ ,  $CeCO_3^+$ ,  $Cu(CO_3)_2^{-2}$ ,  $DyCO_3^+$ ,  $ErCO_3^+$ ,

 $EuCO_3^+$ ,  $GdCO_3^+$ ,  $HoCO_3^+$ ,  $LuCO_3^+$ ,  $NdCO_3^+$ ,  $PrCO_3^+$ ,  $SmCO_3^+$ ,  $SrCO_3$ ,  $TbCO_3^+$ ,  $TmCO_3^+$ ,  $YbCO_3^+$ . Они характеризуются низкой растворимостью гидроксильных соединений, но способны к образованию хорошо растворимых комплексов. Например, существование редкоземельных элементов (P39) в моделируемых водах связано в основном с образованием достаточно устойчивых карбонатных комплексов. Поскольку в системе концентрации  $CO_3^{-2}$ -иона с ростом pH постепенно возрастают, в рассматриваемых водах наблюдается увеличение простых карбонатных комплексов. Тем не менее на примере тория, для которого характерна тесная корреляция с P39, обусловленная как гипогенным парагенезисом P39-Th, так и близкими формами нахождения этих элементов в природных водах, видно, что миграция тория осуществляется в форме  $Th^{+4}$ , что может свидетельствовать об отсутствии достаточных концентраций аддендов в рассматриваемой системе.

Выделены анионогенные элементы, обладающие способностью образовывать в водных растворах анионы с кислородом (ионный потенциал >10, электроотрицательность > 1100 кДж/моль): ScO<sub>2</sub>-, GaO<sub>2</sub>-, GaO<sup>+</sup>, CrO<sub>4</sub>-<sup>2</sup>, HCrO<sub>4</sub>-, YO<sup>+</sup>, ZrO<sub>2</sub>, CO<sub>3</sub>-<sup>2</sup>, UO<sub>2</sub>+<sup>2</sup>, MnO<sub>4</sub>-, SeO<sub>4</sub>-<sup>2</sup>, WO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, NbO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HBeO<sub>2</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>VO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HVO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, HZrO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HHfO<sub>3</sub>, HAsO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, H<sub>2</sub>AsO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HSbO<sub>2</sub><sup>0</sup>, SnO<sub>5</sub>  $HSnO_2^-$ ,  $H_3SiO_4^-$ ,  $HSiO_3^-$  – оксианионы. Обращает на себя внимание то, что в моделируемой системе «вода – гранит» SbO<sub>3</sub><sup>-</sup> в значимых количествах не образуется и трансформируется в кислоту  $HSbO_2^0$ уравнению согласно потенциалзадающей  $SbO_3^-/HSbO_2^0$ . Но с увеличением щелочности вод (Eh = 0.843 $\rightarrow$ 0.697; pH = 6.32 $\rightarrow$ 8.80)  $SbO_2^$ может приобретать в них значимое количество. Также и вольфрам – типичный анионоген, образует соединение  $WO_4^{-2}$ , обладающее малой растворимостью. В присутствии других элементов (Mn, Pb, Cu и т.п.)  $WO_4^{-2}$  может осаждаться в виде вольфраматов. Но степень диссоциации вольфрамовой кислоты возрастает с увеличением щелочности вод, поэтому с ростом рН наблюдается рост содержаний вольфрама в растворе. Уран в моделируемой системе тоже образует комплексный катион  $UO_2^{+2}$  с прочной ковалентной связью, что также свидетельствует о возможности накопления урана в рассматриваемых водах и хорошей его миграционной способности.

Такие элементы, как Fe, Al, Mg, малоподвижны в слабощелочном растворе, поэтому резкого их накопления не наблюдается, однако именно эти компоненты дают начало новым минеральным фазам. Практически сразу, при минимальных соотношениях масс Т/Ж, рассматриваемые воды равновесны с монтмориллонитом, что свидетельствует о развитии в зоне выветривания гранитов глин монтмориллонитовой группы. Монтмориллониты обладают максимальной сорбционной емкостью и контролируют содержание химических элементов в водах.

#### Заключение

Ha основании физико-химического моделирования процесса растворения породообразующих минералов в системе «вода – гранит», расчета равновесных форм миграции элементов, анализа их физико-химических параметров показано, что перенос и аккумуляция металлов в углях и в коре выветривания гранитов обрамления Раковской впадины зависят от гидрогеохимических условий, времени взаимодействия воды с горной породой и определяются миграционными способностями элементов. Несмотря на то, что при анализе результатов моделирования возникали новые вопросы, связанные с гипергенными преобразованиями породы и воды в системе «вода – гранит», которые требуют дальнейшего изучения, полученные данные могут свидетельствовать в пользу того, что рассматриваемые лейкократовые граниты докайнозойского фундамента могли являться источником критических металлов, концентрируемых в углях Раковской впадины.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, проект № 21-55-53013 ГФЕН а.

#### Список литературы

1. Угольная база России. Том V, кн. 1. Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока (Хабаровский край, Амурская область, Приморский край, Еврейская АО) / Под ред. В.И. Подоляна. М.: Геоинформмарк, 1997. 371 с.

- 2. Седых А.К. Кайнозойские рифтогенные впадины Приморья (геологическое строение, минерагения и геодинамика углегенеза). Владивосток: Дальнаука, 2008. 248 с.
- 3. Seredin V.V., Dai S. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium // International Journal of Coal Geology. 2012. V. 94. P. 67–93.
- 4. Чекрыжов И.Ю., Середин В.В., Арбузов С.И. Редкоземельные элементы и уран в углях Раковской впадины, Южное Приморье // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Томск, 2016. С. 703–706.
- 5. Павлюткин Б.И., Петренко Т.И. Стратиграфия палеоген-неогеновых отложений Приморья. Владивосток: Дальнаука, 2010. 164 с.
- 6. Костин Ю.П., Мейтов Е.С. К генезису месторождений высокогерманиеносных углей и критериям их поисков // Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1972. № 1. С. 112–119.
- 7. Середин В.В. Металлоносность углей: условия формирования и перспективы освоения // Угольная база России. М.: Геоинформмарк, 2004. Т. VI. С. 453–519.
- 8. Bechtel A., Chekryzhov I.Yu., Pavlyutkin B.I., Nechaev V.P., Dai S., Vysotskiy S.V., Velivetskaya T.A., Tarasenko I.A., Guo W. Composition of lipids from coal deposits of the Far East: relations to vegetation and climate change during the Cenozoic // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2020. V. 538. Article ID 109479.
- 9. Nechaev V.P., Dai Sh., Bechtel A., Chekryzhov I.Yu., Pavlyutkin B.I., Vysotskiy S.V., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Guo W., Tarasenko I.A., Nechaeva E.V., French D., Hower J. Bio-geochemical evolution and critical element mineralization in the Cretaceous-Cenozoic coals from the southern Far East Russia and northeastern China // Applied Geochemistry. 2020. V. 117. Article ID 104602.
- 10. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 384 с.
- 11. Тарасенко И.А. Геохимические особенности состава и закономерности формирования подземных вод в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт. М.: ГЕОС, 2018. 247 с.
- 12. Tarasenko I., Zinkov A., Zinkova E. Physical and chemical regularities of water's composition formation in natural and technogenic geological structures of closed coal mines ("water-rock" model verification) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. 459. Article ID 052088.
- 13. Чудненко К.В., Карпов И.К. Краткая инструкция «Селектор Windows программное средство расчета химических равновесий минимизаций термодинамических потенциалов». Иркутск, 2003. 90 с.
- 14. Haas J.L., Robinson G.R., Hemingway B.S. Thermodynamic tabulations for selected phases in the system CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O at 101.325 kPa (1 atm) between 273.15 and 1800 K // Journal Phys. and Chem. Ref. Data. 1981. V. 10, N 3. P. 575–669.
- 15. Shock E.L. Organic acids in hydrothermal solutions: Standard molal thermodynamic properties of carboxylic acids and estimates of dissociation constants at high temperatures and pressures // Amer. Journal Sci., 1995. V. 295. P. 496–580.
- 16. Shock E.L., Koretsky C.M. Metal-organic complexes in geochemical processes: Estimation of standard partial molal thermodynamic properties of aqueous complexes between metal cations and monovallent organic acid ligands at high pressure and temperatures // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. P. 1497–1532.
  - 17. Рид Р., Праусниц Лж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей, Л.: Химия, 1982, 591 с.
- 18. Robie R.A., Hemingway B.S. Thermodynamic properties of minerals and related substances at 298.15 K and 1 bar (105 Pascals) pressure and at higher temperatures // US Geol. Surv. Bull. Wash. (D.C.). 1995. N 2131. 461 p.
- 19. Yokokawa H. Tables of thermodynamic properties of inorganic compounds // Journal Nat. Chem. Lab. Industry. 1988. V. 83. P. 27–121.
- 20. Рыженко Б.Н., Крайнов С.Р. Физико-химические факторы формирования химического состава вод зоны гипергенеза // Геохимия. 2002. № 8. С. 1–28.
- 21. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец. М.: Наука, 2004. 677 с.

### ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА РОВ И РЗЭ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УГЛЕКИСЛЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-235-239

Украинцев А.В.  $^1$ , Плюснин А.М.  $^1$ , Чернявский М.К.  $^1$ , Луканов Д.Д.  $^2$   $^1$  Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, ukraintsev87@bk.ru  $^2$  Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Аннотация. В статье рассмотрены особенности формирования состава растворенного органического вещества (РОВ) и редкоземельных элементов (РЗЭ) на месторождениях углекислых минеральных вод Молоковка, Шиванда, Дарасун и Кука. Предполагается, что состав РОВ и РЗЭ в исследуемых водах в значительной мере определяется процессом гранитизации территории. Флюид углекислого газа, отделяющийся при кристаллизации гранитных интрузий, перемещаясь к поверхности, взаимодействует с породами. Под его воздействием увеличивается растворимость предельных углеводородов, повышается их содержание в водах. Состав РЗЭ также формируется при взаимодействии углекислого флюида с водой.

**Ключевые слова:** холодные углекислые воды, растворенные органические вещества, редкоземельные элементы, флюид углекислого газа.

**Abstract.** The article discusses formation features of dissolved organic matter (DOM) and rare earth elements (REE) composition at the deposits of carbonic mineral waters Molokovka, Shivanda, Darasun and Kuka. It is assumed that the composition of DOM and REE in the studied waters is largely determined by the process of granitization of the territory. Carbon dioxide fluid, which is separated during the crystallization of granite intrusions, moving to the surface, interacts with rocks. Under its influence, the solubility of saturated hydrocarbons increases, and their content in waters grows. The REE composition is also formed by the interaction of carbon dioxide with water.

Keywords: cold carbonic waters, dissolved organic matter, rare earth elements, carbon dioxide fluid.

Геологические условия месторождений минеральных вод Восточного Забайкалья разнообразны. Большинство разведанных месторождений связано с межгорными впадинами, где минеральные воды располагаются в разнообразных осадочных породах. Наряду с ними есть месторождения, где разгрузка минеральных вод происходит из кристаллических пород в пределах гидрогеологических массивов. Несмотря на значимые различия в геологическом строении мест разгрузки минеральных вод, их объединяет то, что источником углекислого гранитные неизменно остаются интрузивы. Граниты являются распространенными породами на территории Забайкалья. В гидрогеологических массивах они выходят на поверхность, в межгорных впадинах слагают фундамент. гранитизации этой территории начался в палеозойскую эру, продолжался в мезозое и, по нашим представлениям, продолжается до сих пор. Побочным продуктом процесса гранитизации территории является формирование потока углекислого газа в проницаемых зонах, с которыми и связаны месторождения углекислых минеральных вод.

В представленной работе мы попытаемся увязать некоторые параметры химического состава минеральных вод рассматриваемых месторождений с процессом гранитизации этой территории. Будут рассмотрены особенности химического состава растворенных органических веществ и выявленные нами закономерности в распределении редкоземельных элементов.

Нами был изучен химический состав растворенных углеводородов и распределение редкоземельных элементов в водах ряда месторождений Забайкальской провинции холодных углекислых минеральных вод: Молоковка, Шиванда, Дарасун и Кука.

Курорт Молоковка находится в долине р. Молоковка (правый приток р. Ингода), в пределах северных отрогов хребта Черского. В окрестностях курорта развиты разнообразные, преимущественно вулканогенные, породы. В описываемом районе установлены очень древние породы: гнейсы, гранитогнейсы и гнейсовидные биотитовые граниты, а также диориты и гранодиориты, которые в районе курорта встречаются в виде ксенолитов и небольших тел среди более молодых, палеозойских гранитов. Палеозойскими гранитами (Молоковская интрузия) в основном и сложен район выхода углекислых подземных вод. Разгрузка минеральных вод в виде источника связана с глубинным

разрывным нарушением северо-западного простирания. Воды курорта Молоковка по своему составу гидрокарбонатные магниево-кальциевые с температурой на выходе 4.7 °C и рН 6.2.

Источники минеральных углекислых вод курорта Шиванда приурочены к долине одноименной реки, берущей начало на северо-западном склоне Ононского хребта и впадающей в р. Ингода. В районе Шивандинского месторождения развиты мезозойские конгломератовые сланцы, которые в северной части месторождения резко сменяются серией переслаивающихся между собой вулканогенных и осадочных пород, выполняющих Ингодинскую депрессию. Толща конгломератовых сланцев сильно метаморфизована, прорвана интрузиями мезозойских гранитов, а также жилами пегматитов северо-западного простирания. Недалеко от месторождения располагается Первомайское месторождение редких элементов. Тектонические нарушения и сопутствующие им зоны дробления играют решающую роль в накоплении и движении подземных вод в коренных породах. По химическому составу минеральные воды Шиванды гидрокарбонатные магниево-кальциевые с температурой 1.4 °C и рН 5.8.

Дарасунское месторождение углекислых минеральных вод расположено в долине небольшой речки Дарасун, впадающей справа в р. Тура. В геологическом строении района принимают участие породы палеозойского, мезозойского и четвертичного возраста. Непосредственно на территории курорта развита песчанико-сланцевая ононская свита, относимая к палеозою. Мезозойские песчанико-конгломератовые породы выполняют здесь грабен шириной около 500 м, вытянутый в север-северо-восточном направлении. Тектоническая раздробленность песчанико-конгломератовой толщи и связанные с ней коллекторские свойства пород обусловили приуроченность Дарасунского месторождения минеральных вод именно к этой зоне. По своему химическому составу воды Дарасуна гидрокарбонатные магниево-кальциевые, температура на выходе 4.7 °C, рН 5.7.

Район курорта Кука расположен в месте сочленения Яблонового хребта с Ингодино-Читинской впадиной. Южные отроги Яблонового хребта и долина р. Кислый Ключ сложены в основном дислоцированными массивно-кристаллическими породами, в ряде мест прорванными крупными, преимущественно гранитными интрузиями. Основная роль в геологическом строении района Кукинского месторождения принадлежит комплексу интрузивных и эффузивных пород, перекрытых в долине р. Кислый Ключ аллювиально-делювиальными отложениями. В формировании и разгрузке углекислых минеральных вод большое значение имеет разлом северо-западного простирания. Кукинские минеральные воды по своему составу являются углекислыми гидрокарбонатными кальциево-магниевыми, реже магниево-кальциевыми, с температурой на выходе 6.4 °C и рН 6.0 [1].

На формирование состава растворенных углеводородов в этих водах оказывают влияние различные факторы как биогенной, так и абиогенной природы [2]. Мы считаем, что присутствие значительной части органических соединений в минеральных водах является следствием глубинных процессов с участием сверхкритических флюидов CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O.

Состав растворенных органических веществ (РОВ) в исследуемых водах определялся с помощью методики, основанной на концентрировании методом твердофазной экстракции с газовым хромато-масс-спектрометрическим окончанием [3]. С помощью портативной установки экстракция производилась непосредственно после отбора пробы. Это позволило зафиксировать именно тот состав растворенного органического вещества, который присутствует непосредственно на выходе минерального источника. В концентрирующей установке используются патроны с универсальным сорбентом Strata C18-E (Phenomenex) на основе силикагеля с химически привитыми функциональными группами. Через патрон с сорбентом пропускается 100 мл предварительно профильтрованной анализируемой воды при скорости потока 1 мл/мин. В качестве растворителя для кондиционирования (подготовки) патрона и экстракции аналита используется ацетонитрил. При элюировании через сорбент пропускается 1 мл ацетонитрила. Методика позволяет концентрировать органические вещества в 100 раз. Дополнительное упаривание полученной пробы на водяной бане повышает коэффициент концентрации до 1000. Состав органических веществ в концентрате

определяется методом газовой хромато-масс-спектрометрии в Институте катализа СО РАН с использованием имеющегося в этом институте банка данных органических веществ и стандартных образцов.

В пробах воды четырех источников минеральных вод было сделано 156 определений органических соединений. Выявленные вещества сгруппированы в девять классов (табл. 1).

Таблица 1. Углеводороды, обнаруженные в углекислых минеральных водах, %

Месторож- дения	Нормальные алканы	Разветвленны е алканы	Спирты	Разветвленны е спирты	Дикарбоновы е кислоты	Ароматическ ие соединения	Фталаты	Сложные эфиры	Неопред. вещества
Молоковка	4.32	14.44	11.7	0.22	0.68	5.82	3.8	55.98	3.04
Шиванда	5.51	16.54	16.91	0.62	2.38	4.43	5.35	46.59	1.7
Дарасун	5.01	19.75	6.55	0.48	0.7	2.29	2.38	58.96	3.86
Кука	2.51	10.84	8.1	0.11	0.68	3.91	3.37	68.6	1.89

Во всех пробах установлены относительно высокие содержания алканов как нормального, так и разветвленного строения. Известно, что в обычных условиях эти соединения плохо растворимы в воде. Повышенное содержание алканов в углекислых минеральных водах, вероятно, связано с тем, что их растворимость возрастает под воздействием углекислого газа, находящегося в сверхкритическом состоянии.

Установлены значимые содержания спиртов различной структуры, дикарбоновых кислот. Во всех пробах присутствуют ароматические соединения и фталаты. Сложные эфиры представлены в основном ди-(2-этилгексиловым) эфиром адипиновой кислоты, происхождению этого соединения в пробах пока не удается найти объяснение. Во всех образцах присутствует небольшой процент соединений (от 1.7 до 3.9), для которых не удалось определить даже принадлежность к какому-либо классу.

Наибольший процент предельных углеводородов наблюдается в водах Дарасунского месторождения. Важной особенностью этих вод является их высокая газонасыщенность. Именно поступающая в большом количестве с глубины углекислота создает условия для накопления алканов различной структуры в водах Дарасуна.

О преобладающем источнике органического вещества может свидетельствовать индекс OEP (odd-even predominance), который рассчитывается по формуле (1) [4]:

$$OEP_{i} = \left(\frac{c_{i} + 6c_{i+2} + c_{i+4}}{4c_{i+1} + 4c_{i+8}}\right)^{(-1)^{i+1}}.$$
(1)

Считается, что значения индекса ОЕР, близкие к единице, говорят об абиогенном происхождении углеводородов; в свою очередь, значения, отличные от единицы в большую или меньшую сторону, говорят о доминирующем биогенном источнике органических веществ [5]. Полученные нами данные позволили рассчитать индекс ОЕР для углеводородов исследуемых вод по пяти гомологам, начиная с С14 (табл. 2).

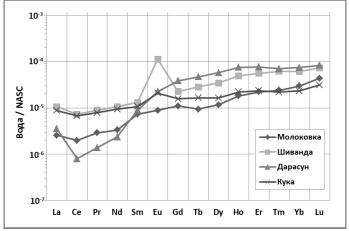
Таблица 2. Содержание н-алканов и показатель ОЕР<sub>14</sub> исследуемых вод месторождений

Месторож-		OEP <sub>14</sub>					
дения	C14	C15	C16	C17	C18	OEF 14	
Молоковка	1.32	1.05	0.95	0.84	0.16	1.05	
Шиванда	1.25	1.25	1.1	0.98	0.93	1.02	
Дарасун	1.01	1.69	1.2	0.62	0.49	1.06	
Кука	1.12	0.87	0.26	0.18	0.08	1.52	

По данным таблицы 2 можно заключить, что значения индекса ОЕР для углеводородов вод Молоковки, Шиванды и Дарасуна отклоняются от единицы не более чем на 0.06. Это говорит о том, что органическое вещество глубоко преобразовано, состав углеводородов сформировался без участия биогенных факторов.

Состав растворенных углеводородов воды Кукинского месторождения характеризуется индексом ОЕР, равным 1.52. По всей видимости, в формировании углеводородов в этих водах принимают участие факторы биогенной природы. В пользу этого предположения говорят данные таблицы 1, в водах Куки наименьший среди исследуемых вод процент алканов, как нормальных, так и разветвленных.

исследованных минеральных водах установлены относительно содержания редкоземельных элементов (РЗЭ). На Молоковском месторождении их содержание составляет 0.758 мкг/л, Шиванде -2.324 мкг/л, Дарасуне 1.522 мкг/л, Куке -1.611 мкг/л. На рисунке представлены спектры распределения редкоземельных элементов в исследованных водах, нормированные по содержанию в североамериканском сланце (NASC) [6]. Для всех вод характерно преобладание тяжелых редких земель над легкими. Наиболее резкие различия между легкими и тяжелыми редкими землями характерны для минеральных вод Дарасуна, где они достигают двух математических порядков. На этом месторождении наблюдается и наиболее интенсивное выделение свободного углекислого газа. По нашим оценкам, здесь его выделяется более ста кубических метров в сутки, даже производится его извлечение. Ha других рассматриваемых месторождениях газоотделение в меньших объемах.



Спектры распределения концентраций редкоземельных элементов в водах, нормированные по содержанию в североамериканском сланце (NASC).

Нами предполагается, что поток углекислого газа на рассматриваемых месторождениях формируется за счет отделения его из кристаллизующихся на большой глубине (более 10–15 км) гранитных интрузий. Растворимость углекислого газа в магматическом расплаве зависит от температуры расплава, она увеличивается с понижением температуры [7]. Соответственно интенсивность выделения флюида от кристаллизующейся интрузии меняется во времени, вначале флюид выделяется более интенсивно, затем дегазация понижается. Кроме того, меняется состав флюида, дегазация расплавов гранитов начинается с выделения сухой углекислоты, затем происходит насыщение флюида водой, а концентрация углекислого газа падает [8–10].

С другой стороны, известно, что при кристаллизации гранитных интрузий в отделяющемся флюиде происходит изменение во времени соотношения легких и тяжелых редких земель [11]. Первоначально во флюиде, который представлен в основном углекислым газом, преобладают тяжелые редкоземельные элементы. Затем количество отделяющегося углекислого газа уменьшается, происходит повышение рН водных растворов, и во флюиде возрастает доля легких редкоземельных элементов. Различный наклон в кривых

распределения РЗЭ на рассматриваемых месторождениях, вероятно, связан с различной температурой интрузии, из которой генерируется поток углекислого газа. Можно предположить, что на Дарасунском месторождении отделение углекислого газа происходит из самой высокотемпературной интрузии, во флюиде которой доминирует углекислый газ.

Первоначально флюид углекислого газа и вода перемещаются двумя несмешивающимися потоками, независимо взаимодействуя с породами. Только вблизи поверхности, когда давление падает до 75 кгс/см $^2$ , а температура до 31  $^{\rm o}$ C, происходит образование газовой фазы  ${\rm CO}_2$  [12]. При этом все растворенное во флюиде углекислого газа вещество переходит в воду. Вероятно, определяемый в водах состав редкоземельных элементов и органических веществ в значительной мере определяется именно этим процессом.

Что касается положительной европиевой аномалии в минеральных водах месторождений Шиванда и Кука (рисунок), то нам представляется, что европий выщелачивается из вмещающих пород в момент, когда CO<sub>2</sub> из флюидного состояния переходит в газообразную форму; в это время водные растворы становятся очень кислыми и агрессивными. Это косвенно подтверждается выносом редкоземельных элементов из измененных водовмещающих пород месторождения Ласточка (Приморье) [13].

Для подъема газа к поверхности большое значение имеют проницаемые разрывные нарушения, образующиеся в хрупких кристаллических породах, которые в регионе представлены в основном палеозойскими гранитами. Эти граниты являются покрышкой, под которой длительное время протекают процессы плавления и кристаллизации кислых интрузий. В результате этого происходит наращивание гранитной оболочки и выделяется углекислый газ, который обнаруживается в минеральных водах.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту AAAA-A21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока.

- 1. Минеральные воды южной части Восточной Сибири. Т. 1: Гидрогеология минеральных вод и их народнохозяйственное значение / Под общ. ред. В.Г. Ткачук и Н.И. Толстихина. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. 346 с.
- 2. Абрамов В.Ю. Формирование органического химического состава углекислых минеральных вод Ессентукского и Нагутского месторождений // Разведка и охрана недр. 2014. № 5. С. 47–51.
- 3. Украинцев А.В., Плюснин А.М. Применение метода твердофазной экстракции для анализа состава растворенных органических веществ в углекислых минеральных водах // Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике: Материалы V всероссийской молодежной научной конференции. Улан-Удэ, 2019. С. 90–92.
- 4. Scalan E.S., Smith J.E. An improved measure of the odd-to-even predominance in the normal alcanes of sediment extracts and petroleum // Geochimica et cosmochimica acta. 1970. V. 34. № 5. P. 611–620.
- 5. Потурай В.А., Компаниченко В.Н. Состав и распределение предельных углеводородов в термальных водах и пароводяной смеси Мутновского геотермального района и кальдеры Узон (Камчатка) // Геохимия. 2019. № 1. С. 79–88.
- 6. Gromet L.P., Dumek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The "North American shale composite": Its composition, major and trace element characteristics // Geochim. et Cosmochm. Acta. 1984. V.48. P. 2469–2482.
- 7. Fogel R.A., Rutherford M.J. The solubility of carbon dioxide in rhyolitic melts a quantitative FTIR study // Amer. Miner. 1990. V. 75, № 11–12. P. 1311–1326.
  - 8. Рябчиков И.Д. Термодинамика флюидной фазы гранитоидных магм. М.: Наука, 1975. 232 с
- 9. Tamic N., Behrens H., Holtz F. The solubility of H2O and CO2 in rhyolitic melts in equilibrium with a mixed  $CO^2$ — $H^2O$  fluid phase // Chem. Geol. 2001. V. 174. P. 333–347.
- 10. Смирнов С.3. Флюидный режим кристаллизации водонасыщенных гранитных и пегматитовых магм: физико-химический анализ // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 9. С. 1643–1663.
- 11. Попова Ю.А., Матвеева С.С., Бычков А.Ю., Тернопольская М.Е., Бычкова Я.В. Поведение лантаноидов при формировании минерализованных куполов на примере Спокойнинского месторождения (Забайкалье) // Геохимия. 2017. № 2. С. 178–185.
  - 12. Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E.The properties of gases and liquids. New York: McGraw-Hill, 1987.
- 13. Челноков Г.А., Харитонова Н.А. Углекислые минеральные воды юга Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2008. 165 с. ISBN 978-5-8044-1000-2.

## ГЕОХИМИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ ЕВРАЗИИ: ЦИРКУЛЯЦИЯ ФЛЮИДА В ЗОНЕ СУБДУКЦИИ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-240-244

Харитонова Н.А.<sup>1</sup>, Челноков Г.А.<sup>2</sup>, Брагин И.В.<sup>3</sup>, Асеева А.В.<sup>3</sup>, Лямина Л.А.<sup>1</sup>, Барановская Е.И.<sup>1</sup>, Корзун А.В.<sup>1</sup>, Хитоми Накамура<sup>4,5</sup>, Хикару Ивамори<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, tchenat@mail.ru

<sup>2</sup>Геологический Институт РАН, Москва, geowater@mail.ru

<sup>3</sup>Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток,

<sup>4</sup>Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology;

<sup>5</sup>Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Аннотация. В статье представлены новые данные по химическому и изотопному составу термоминеральных источников Охотско-Япономорского региона в совокупности с детальным изучением геолого-структурных особенностей территории. Полученный фактический материал позволил выявить роль тектонического строения Сихотэ-Алиня, островов Сахалин и Хоккайдо в формировании различных геохимических типов минеральных источников, а также произвести оценку трансформации исходного глубинного флюида в процессе взаимодействия с вмещающей толщей.

Ключевые слова: термоминеральные источники, изотопы, Охотско-Япономорский регион, РЗЭ.

**Abstract.** The article presents new data on the chemical and isotopic parameters of thermal mineral springs located within the Okhotsk-Japanese region and a detailed study of the geological and structural settings of the territory. Obtained results allowed us to reveal the role of the tectonic structure of Sikhote-Alin, Sakhalin, and Hokkaido islands in the formation of different geochemical types of mineral springs and specify the transformation of the initial fluid during interaction with the host strata.

**Key words:** thermo-mineral sources, isotopes, Okhotsk-Japanese region, REE.

Выявление природы и механизмов формирования изотопно-химического состава минеральных источников зон тектонически активных областей, определение влияния геодинамической обстановки на условия их циркуляции, а также оценка масштабов взаимодействия вод с вмещающими породами – важнейшие задачи геохимии. Изотопногеохимический состав флюида регулируется в значительной мере геологическим строением и тектоникой той территории, где он циркулирует [1–5]. Отчетливо это влияние проявляется во флюидных системах зон субдукции, для которых характерны высокие скорости вертикальных движений земной коры, развитие зон тектонического дробления, а также (часто) проявления молодого вулканизма. Повсеместно в зонах субдукции возникают обширные трещинные системы, которые обеспечивают глубокое проникновение метеорных вод и в то же время облегчают поступление в верхние гидрогеологические этажи глубинных флюидов. Поскольку при этих процессах тепловые потоки имеют высокую температуру, в тектонически активных областях возникает особенный механизм трансформации состава флюида при его взаимодействии с вмещающими породами. Основная цель данной работы выявление генезиса глубинного флюида и оценка масштаба преобразования вмещающих толщ Охотско-Япономорского региона на основе исследования химического, изотопного и газового состава термоминеральных источников данной территории.

#### Объект исследования

В зоне сочленения Охотоморского и Япономорского регионов локализованы многочисленные выходы минеральных источников различного химического, изотопного и газового состава. В континентальной части, на территории Сихотэ-Алиня, выделены три провинции минеральных источников: холодных углекислых вод областей молодой магматической деятельности; азотных щелочных терм областей новейших тектонических движений; азотных, азотно-метановых и метановых вод артезианских бассейнов платформ, краевых прогибов и складчатых областей. Большая часть известных проявлений углекислых минеральных вод приурочена к Амуро-Уссурийской области, локализованной главным образом на западном склоне Сихотэ-Алиня.

На островной части, на территории о. Сахалин, три группы минеральных источников отчетливо диагностируются: 1) холодные Ca-Na-Mg-Cl-HCO $_3$  воды с  $H_2$ S-N $_2$  газом, 2)

холодные ( $T=10-12~^{\circ}C$ ) и низкотемпературные ( $T=30-50~^{\circ}C$ ) Na-Cl and Na-Cl-HCO<sub>3</sub> метановые воды и 3) холодные углекислые воды Na-Ca-Cl-HCO<sub>3</sub> состава. В отличие от H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> минеральных вод, разгрузка углекислых вод в виде источников не обнаружена. Эти воды были открыты в процессе бурения.

На территории о. Хоккайдо изливается огромное количество разнообразных по химическому и газовому составу источников.

#### Геологические условия

Согласно принятому в настоящее время тектоническому районированию российского Дальнего Востока, Восточный Сихотэ-Алинь и остров Сахалин являются частями Сихотэ-Алинь—Северо-Сахалинского и Сахалино-Хоккайдского орогенных поясов [6]. Первый орогенный пояс разделяется на континентальную (Сихотэ-Алинь) и островную (Северный Сахалин) части миоценовым рифтом Татарского пролива. Субмеридиональный Центрально-Сихотэ-Алинский разлом делит Сихотэ-Алинь на две неравные части: Западный и Восточный, состоящий из трех аккреционных террейнов, имеющих вероятные аналоги в Северо-Восточной Японии.

Сахалинская часть Сахалино-Хоккайдского орогенного пояса состоит из двух раннемеловых островодужных террейнов, из двух позднемеловых аккреционных террейнов, среднепозднемелового островодужного террейна и турбидитового преддугового бассейна (Западно-Сахалинский террейн). Все эти террейны имеют предполагаемое продолжение на о. Хоккайдо [6].

Геологическая история развития о. Хоккайдо во многом схожа с историей о. Сахалин. Западные структуры о. Хоккайдо сложены юрскими терригенными отложениями, которые интерпретируются как остатки аккреционной призмы (зона Ошима). Имеются терригенные комплексы верхнего мела (мощностью до 10000 м), которые залегают на кремнистотерригенных толщах раннемелового возраста, представляющих собой Западно-Сахалинскую зону и протягивающихся до пролива Невельского вдоль запада о. Сахалин, включая Центральная часть o. Хоккайдо сложена пролив. мел-эоценовыми метаморфическими образованиями (слюдистыми сильно деформированными сланцами с линзами зеленых сланцев, кварцитов, мраморизованных известняков) зоны Камуикотан. Они близки по составу с породами Сусунайской зоны (юг Сахалина). Восточнее центральной Хоккайдо расположена зона Хидака, части сложенная верхнемеловыми нижнеэоценовыми комплексами, которые интерпретируются как аккреционная призма. Ее контакт с более западной зоной проходит по шву Идоннаппу, имеющему аналоги на юге о. Сахалин (Мерейская зона). Восточная часть о. Хоккайдо сложена зонами Токоро и Немуро, имеющими аналоги на юге Сахалина.

#### Результаты исследования

Полученные в течение 2019–2020 гг. аналитические данные и их последующая интерпретация показали, что тектоническое строение и гидрогеологические условия изученных районов играют важную роль для проникновения, изоляции (захоронения) или циркуляции вод. В областях, где в кайнозое происходили активные процессы осадконакопления (о. Сахалин), глубинный тепловой поток на поверхности ниже, чем в более древних геологических структурах (Сихотэ-Алинь), поскольку значительная часть тепловой энергии расходуется на разогрев осадочных толщ, при котором происходит разложение органического вещества осадочного субстрата и формируется метан, который, проникая в водоносные горизонты, способствует формированию азотных Поверхностные источники острова Сахалин характеризуются преимущественно метановым, азотно-метановым или метаново-углекислым составом газов. Углекислые минеральные воды распространены ограниченно, в пределах древних (юрских) акреционных призм (Синегорское) или в областях контактов осадочного чехла с породами фундамента (Волчанское). Термоминеральные источники, в которых присутствует только азот в газовой фазе (без метановой и углекислотной составляющих), на о. Сахалин не встречены.

Глубинный генезис углекислого газа источников о. Сахалин подтверждается значениями  $\delta^{13}C_{CO2}$  (-3.30...-6.03 %), а термогенная природа метана — значениями  $\delta^{13}C_{CH4}$  (-27.5...-30.0 %) и  $\delta D_{CH4}$  (-72...-264 %). Газовый и изотопный состав метановых и азотнометановых источников указывает, на то, что биогенные процессы являются важным источником генерации углеводородных газов,  $\delta^{13}C_{CH4}$  варьируется от -45.9 до -66.1 %. Азот имеет атмогенный генезис ( $\delta^{15}N\approx0$ ).

На основе данных по содержанию и соотношению изотопов инертных газов  ${}^{3}$ He/ ${}^{4}$ He,  ${}^{38}$ Ar/ ${}^{36}$ Ar,  ${}^{40}$ Ar/ ${}^{36}$ Ar,  ${}^{20}$ Ne/ ${}^{22}$ Ne,  ${}^{21}$ Ne/ ${}^{22}$ Ne был выполнен расчет источников гелия в газовой фазе минеральных вод Сихотэ-Алиня по формулам из работы [1]. Полученные результаты представлены в таблице и на рисунке.

 $^{3}$ He/ $^{4}$ He,  $^{4}$ He/ $^{20}$ Ne, C/ $^{3}$ He соотношения и источники гелия в минеральных водах Сихотэ-Алиня

Расположение	Проявление	pCO <sub>2</sub>	<sup>4</sup> He/ <sup>20</sup> Ne	( <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He) кор	C/ <sup>3</sup> He	A	К	M
объекта	Проявление	bar		*10-6	*107		%	
Восточный Сихотэ-Алинь	Горноводное, скв. 2	1.5	19.2	6.5	12	2	39	59
	Горноводное, скв. 66	0.8	19.1	6.1	11	2	43	55
	Лужки, скв.	1.3	7.82	4.6	12	4	55	41
Западный Сихотэ-Алинь	Шмаковка, ист. Медвежий	1.7	1.12	4.1	5	28	38	34
	Шмаковка, ист. Авдеевский	0.9	3.06	6.3	_	10	34	56
Центральный Сихотэ-Алинь	Большой ключ, ист.	1.8	26.2	6.1	4.7	1	44	55
Северный	Мухен, скв. 3	0.24	4.025	7.21	_	8	25	67
Сихотэ-Алинь	Мухен, скв. 30	0.47	0.671	4.99	_	47	13	39

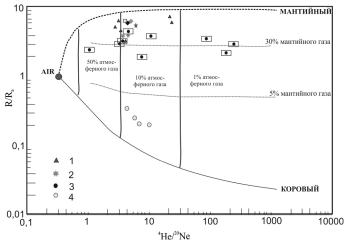
Примечание. А – атмосферная, К – коровая и М – мантийная компонента.

В пределах континентальной части Сихотэ-Алинского орогена источники минеральных вод в подавляющем большинстве связаны с углекислотной дегазацией мантии. Здесь нет глубинных источников тепла, вследствие чего широко распространены холодные углекислые минеральные воды. Совокупность крупных региональных разломов, тектонических дислокаций и отсутствие мощного осадочного чехла на древних мезозойских кристаллических породах создают условия для проникновения мантийных флюидов в верхние водоносные горизонты земной коры.

Низкоэнтальпийные термальные воды (T<70 °C) и холодные метановые воды локально распространены по побережью и формируются благодаря многочисленным факторам, основными из которых являются раздробленность пород, глубина проникновения, малые площади водосборов. Метановые воды формируются в пределах древних речных долин, заполненных органическим материалом, но малая мощность этих отложений не позволяет образоваться залежам углеводородов.

Наши данные показывают, что примерно 40 % гелия в углекислых минеральных водах Сихотэ-Алиня поступает из мантии, около 13–40 % — коровый гелий, а 2–47 % — атмосферный. Для азотных терм наблюдается другая закономерность, в них значения R — низкие, варьируются от  $0.04\times10^{-6}$  до  $0.41\times10^{-6}$  и близки к каноническому радиогенному R. Полученные результаты показывают, что количество корового гелия в азотных термах составляет 90–98 %, атмосферного гелия — 2–7 %, а мантийного гелия 0.5–3.0 %. Сопоставление  $CO_2/^3$ Не и  $\delta^{13}C_{CO_2}$  газов Сихотэ-Алиня с данными по газам термальных вод Японии указывает на мантийный генезис углекислого газа в обоих районах [5].

Углекислые воды, проявленные в пределах островов Сахалин и Хоккайдо, имеют как магматический генезис  $CO_2$ , так и коровый. Мантийные значения  $\delta^{13}C_{CO_2}\approx -5.24$  % и  $\delta^{13}C_{DIC}\approx -2.98$  % характерны для углекислых вод, распространенных в средней части острова, в пределах влияния Западно-Сахалинского разлома. Соотношения  $\delta^{18}O_{H2O}-11.6$  % и  $\delta^{18}O_{DIC}=-15.4$  % растворенных карбонатных форм показывают тождественность источников и процессов их фракционирования. Во всех рассмотренных нами случаях кислород растворенных карбонатных форм всегда облегчен по отношению к кислороду воды.



Соотношение измеренных отношений  ${}^{3}$ He/ ${}^{4}$ He и  ${}^{4}$ He и  ${}^{4}$ He/ ${}^{20}$ Ne в газах исследованных источников. Кривые на рисунках — линии смешения гелия из разных резервуаров. I — углекислые источники Сихотэ-Алиня; 2 — метановые источники Сихотэ-Алиня; 3 — термальные источники Хоккайдо разного газового состава; 4 — азотные термальные источники Дальнего Востока России.

На юге, в пределах древней юрской аккреционной призмы, углекислые воды также имеют значения  $\delta^{13}C_{CO2}$ , характерные для мантии, -6.03 %, но при этом положительные значения растворенного углерода  $\delta^{13}C_{DIC}$  +2.55 %, что указывает на дополнительный процесс, вызывающий накопление в воде тяжелого изотопа углерода. Наиболее вероятными процессами являются: длительная циркуляция подземных вод и активное взаимодействие вода — порода — газ. Значения  $\delta^{18}O_{DIC}$  +5.69 %, и  $\delta^{18}O_{H2O}$  +5.70 %, свидетельствуют о наступившем изотопном равновесии между кислородом карбонатов и воды.

Самыми тяжелыми значениями  $\delta^{13}C_{CO2}$  +2.9 ‰ и  $\delta^{13}C_{DIC}$  +7.41 ‰ характеризуются метановые воды юга о. Сахалин. При этом значения  $\delta^{13}C_{CH4}$  составляют –44.5 ‰. Полученные данные хорошо вписываются в классическую схему разделения изотопов углерода при образовании метана в результате микробного восстановления  $CO_2$  [7]. Различия в значениях  $\delta^{18}O_{DIC}$  –6.5 ‰ и  $\delta^{18}O_{Boдa}$  –1.0 ‰, вероятно, обусловлены микробиологическими процессами.

Азот в азотных минеральных водах о. Сахалин имеет атмосферный генезис ( $\delta^{15}$ N $\approx$ 0), в то время как растворенный карбонат является биогенным ( $\delta^{13}C_{DIC}$  –18.02...–19 ‰). Отличительной особенностью данного типа вод является присутствие в газовом составе H<sub>2</sub>S, который маркирует процессы взаимодействия подземных вод с органическим веществом водовмещающих пород. При разложении органики, в присутствии сульфатов и без доступа кислорода, выделяются сероводород, углекислый газ и метан и фиксируются высокие содержания в воде  $C_{opr}$ .=56.6 мг/л. Значения  $\delta^{18}O_{DIC}$  (–10.8 ‰) и  $\delta^{18}O_{H2O}$  (–10.4 ‰) указывают на изотопное равновесие между фазами и отсутствие влияния эндогенных процессов.

В пределах о. Сахалин и о. Хоккайдо были выявлены минеральные воды, которые, видимо, подверглись преобразованию в толще водовмещающих пород – имеют сильно положительные значения  $\delta^{18}$ О. Максимальные значения  $\delta^{18}$ О в водах Хоккайдо немного ниже сахалинских (+3.8 %). Воды с положительными значениями  $\delta^{18}$ О на о. Хоккайдо не напорные и залегают на глубинах 500–700 м, в то время как воды верхних водоносных

горизонтов имеют изотопные характеристики метеорных вод и отражают широтную зональность.

Было проведено термодинамическое моделирование смешения глубинных флюидов с поверхностными, метеорными и морскими водами с использованием программы PHREEQC и термодинамической базы данных WATEQ4F. Расчеты показали, что доля глинистой воды, отжатой из пород на о. Сахалин и о. Хоккайдо, составляет от 20 до 40 об. %. Результаты исследований японских ученых подтверждают, что изотопный и химический состав подземных вод формации Вакканай формируется при ионном обмене с глинистыми минералами: иллит, смектит, каолинит и хлорит [7]. Так же, как в водах Синегорского месторождения на Сахалине, в водах формации Вакканай на о. Хоккайдо отмечаются очень высокие концентрации NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (до 380 мг/л), обусловленные, видимо, десорбцией компонента из обменного комплекса глинистых минералов в процессе их постседиментационных изменений.

Установлено, что  $Na-Cl-HCO_3$  воды, широко распространенные на исследованной территории, являются результатом взаимодействия захороненных морских вод с водовмещающими породами и несут изотопные черты глубоких метаморфических флюидов. Этот тип вод характеризуется превышением концентраций  $Na^+$  над  $Cl^-$ , которые являются отражением катионного обмена.

Na–HCO<sub>3</sub>–Cl тип вод формируется при взаимодействии метеорных вод с водовмещающими породами. Источником бора, а также значительного количества органических веществ являются породы морского генезиса.

Период водообмена минеральных источников Сихотэ-Алиня и Сахалин-Хоккайдского орогена определен на основе датировок по <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C и <sup>36</sup>Cl. Значение современного поступления <sup>3</sup>H в регионе составляет 8–13 ТЕ, и максимальные концентрации наблюдаются в углекислых минеральных водах Сихотэ-Алиня (3–8 ТЕ) [8]. Минеральные воды глубокого залегания на о. Сахалин и о. Хоккайдо демонстрируют либо отсутствие <sup>3</sup>H, либо весьма низкие концентрации – 0.3–1.3 ТЕ. Датировки <sup>14</sup>C выявляют весьма значительные отличия (на пять порядков) в абсолютном возрасте углекислых и азотных источников: высокоуглекислые воды более древние, чем азотные термальные. Для минеральных вод формации Вакканай также установлен достаточно древний возраст, который не датируется с помощью <sup>14</sup>C. Первые значения <sup>36</sup>Cl показывают, что метаморфические воды о. Хоккайдо были захоронены в осадочном бассейне примерно 1.5 млн лет назад.

- 1. Sano, Y., Wakita, H. Geographical distribution of 3He/4He ratios in Japan: implications for arc tectonics and incipient magmatism. // Journal Geophys. Res. Solid Earth. 1985. 90 (B10). 8729–8742. https://doi.org/10.1029/JB090iB10p08729.
- 2. Nakamura H., Iwamori H. Kimura J.I., Geochemical evidence for enhanced fluid flux due to overlapping subducting plates // Nature Geoscience. 2008. 1. 380–384.
- 3. Reyes A.G., Christenson B.W., Faure K. Sources of solutes and heat in low-enthalpy mineral waters and their relation to tectonic setting, New Zealand // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. 192(3-4). 117–141. doi:10.1016/j.jvolgeores.2010.02.015.
  - 4. Лаврушин В.Ю. Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления. М.: Геос. 2012. 384 с.
- 5. Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Bragin I.V., Chudaev O.V., Shand P., Funikova V.V. Major and trace element geochemistry of CO2-rich groundwater in the volcanic aquifer system of the Eastern Sikhote-Alin (Russia) // Environmental Earth Sciences, Springer Verlag (Germany), 2020 V.79. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8697-y.
- 6. Геодинамика, магматизм и металлогения востока России: в 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
- 7. Scott A.R., Kaiser W.R., Ayers WBJ. Thermogenic and secondary biogenic gases, San-Juan Basin, Colorado and New-Mexico—implications for coalbed gas producibility // AAPG Bull. 1994. 78. P. 1186–1209.
- 8. Харитонова Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В., Вах Е.А. Изотопный состав природных вод юга Дальнего Востока России // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 2. С. 75–86.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ НАСЫЩЕННОЙ И НЕНАСЫЩЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В НАБУХАЮЩИХ ПОРОДАХ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-245-249

Храмченков М.Г., Усманов Р.М.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, mkhramch@gmail.com

**Аннотация.** В работе рассмотрена математическая модель фильтрации воды в набухающих горных породах, почвах и грунтах. Процесс набухания рассмотрен как для случая фильтрации в полностью водонасыщенных горных породах, так и в горных породах зоны неполного насыщения (например, в почвах и грунтах). Проведены экспериментальные исследования процесса набухания и фильтрации в условиях полного и неполного насыщения породы влагой. Показано хорошее согласие теоретических и расчетных данных.

Ключевые слова: насыщенная и ненасыщенная фильтрация, набухание, моделирование.

**Abstract.** The paper considers a mathematical model of water filtration in swelling rocks, soils and grounds. The swelling process is considered both for the case of filtration in completely water-saturated rocks, and in rocks of an incomplete saturation zone (for example, soils and grounds). Experimental studies of the process of swelling and filtration under conditions of complete and incomplete saturation of the rock with moisture have been carried out. Good agreement between theoretical and calculated data is shown.

Key words: saturated and unsaturated filtration, swelling, modelling.

#### Введение

Под набуханием горных пород обычно имеют в виду изменение (если мы говорим о набухании, то увеличение) объема пространства, занимаемого породой, в ходе физического связывания молекул воды глинистыми минералами в составе горных пород за счет межмолекулярного взаимодействия различной природы (электрического, ван-дерваальсового, адсорбционного) благодаря наличию избыточного отрицательного заряда решетки некоторых глинистых минералов и его компенсации адсорбированными катионами, а также большой удельной поверхности частиц глинистых минералов, обусловливающей их высокую адсорбционную способность [1]. Глинистые минералы входят в состав некоторых горных пород, почв и грунтов, в которых и наблюдается набухание.

#### Модель набухания при насыщенной фильтрации

В работах [2, 3] было показано, что баланс массы жидкости в полностью насыщенной водой пористой среде с набухающим скелетом в случае, когда изменением плотности связанной воды можно пренебречь, описывается уравнениями вида:

$$\partial \theta / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0, \ p + RTQ / [V_0(1+\theta) - V_s] = W, \ \mathbf{q} = -k\nabla p / \mu \ .$$
 (1)

Здесь и далее  $\theta$  — дилатация,  ${\bf q}$  — скорость фильтрации; k — проницаемость,  $\mu$  — вязкость, p — давление, R — газовая постоянная, T — температура, Q — емкость обменных катионов,  $V_0$  — начальный объем,  $V_s$  — объем твердой фазы, W — суммарная нагрузка на горную породу.

#### Изучение насыщенной фильтрации в набухающих породах

Для подтверждения теории была собрана установка и выработана методика проведения исследований. Установка позволяла отслеживать и фиксировать особенности процесса набухания в ходе эксперимента, во время которого через однородную пористую среду шел радиальный фронт фильтрации и набухания, т.е. фильтрация имела линейный одномерный характер. В эксперименте использовался сухой, не связный грунт с заранее известными характеристиками, отобранный с Бикляновского месторождения (Татарстан). В опытах использовались образцы темно-серой глины, по минералогическому составу представленной в основном монтмориллонитом (93.84 %,  $W_L$ -45.17,  $W_p$ -20.14). В нижней части камеры находилось отверстие, через которое под постоянным давлением подавалась дистиллированная вода. На определенных отметках грунт имел расположенные на горизонтальной линии маркирующие точки, в которых фиксировались деформации. Для постоянного наблюдения велась непрерывная фотосъемка с частотой 1 кадр в минуту. После завершения эксперимента фиксировалось изменение массы модели для определения

поступившей воды. Для определения масштаба на фотографии модель обладала мерной шкалой с шагом в 1 мм. На этапе обработки, помимо остальных данных, определялись количественные значения деформаций, время фильтрации и заданной величины набухания. Показано, что полученные решения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Уравнение, описывающее поведение фронта набухания в этом случае, имеет вид [3]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot \left( kRTQ\nabla \theta / \left( 2\eta (V_0 - V_s) \left[ \left( V_0 - V_s \right) / \left( 2V_0 \right) + \theta \right] \right) \right)$$
 (2)

Это уравнение далее решалось численно и аналитически. Показано, что удается отыскать точное решение данного уравнения [3]. Далее (рис. 1) изображены результаты расчетов и их сравнение с экспериментальными данными.

# Correlation with experiment $R_{2}(t) = \sqrt{a + be^{-a}}$ a = 5.941119687 b = -6.194854686 c = -0.075375698Experiment $R_{2}(t)$ Classical model Numerical solutionTime

Рис. 1. Сравнение численного и аналитического решения уравнения (2) с экспериментальными данными. Здесь значения радиуса приведены в сантиметрах, времени – в часах.

#### Основные характеристики ненасыщенной фильтрации

Подземные воды на достаточной глубине полностью заполняют доступные им поры горных пород и формируют таким образом воды зоны полного насыщения. Характер перемещения вод этой зоны определяется, прежде всего, действующим давлением (напором, тяжести) создаваемым силой И способностью пород пропускать (фильтрационные свойства горных пород). Однако в почвах и верхних слоях грунтов, как правило, имеет место неполное заполнение пор влагой и совместное присутствие водной и воздушной фаз в порах. Воды, содержащиеся в зоне неполного насыщения влагой (зоне аэрации), перемещаются под действием сил капиллярного давления и гравитации. Считается, что содержащиеся в поровом пространстве воздух и вода формируют непрерывные (связные) фазы. Скорость перемещения воздуха в зоне аэрации много больше скорости перемещения влаги в силу его малой вязкости, поэтому давление, сообщаемое воздухом в зоне аэрации, равно атмосферному. Его часто принимают за ноль с целью удобства расчета сил капиллярного давления. На границе раздела водной и воздушной фаз действуют капиллярные и сорбционные силы, обусловливающие всасывание влаги в поры. При этом давление в водной фазе в зоне аэрации будет отрицательным (оно ниже атмосферного и уравновешивается силой тяжести) и поэтому может быть охарактеризовано высотой всасывания (капиллярно-сорбционным потенциалом)  $\psi$ , равной отрицательной величине капиллярного давления, деленного на удельный вес воды. Между высотой всасывания породы и содержанием влаги в ней существует связь, которая графически изображается кривой, называемой основной гидрофизической характеристикой (ОГХ) почвы или грунта [4]. Вид ОГХ зависит от состава и свойств (прежде всего поверхностных) частиц породы. Кривая ОГХ определяется, как правило, экспериментально, а затем аппроксимируется математическими зависимостями. Примером ОГХ является экспоненциальная зависимость Аверьянова или степенная зависимость Ван-Генухтена [4]. Другой, часто употребляемой, является зависимость Брукса и Кори:

$$\overline{S} = (\psi_b / \psi)^{\lambda}, \ \psi \ge \psi_b; \ \overline{S} = 1, \ \psi \le \psi_b. \tag{3}$$

Многочисленные экспериментальные исследования закономерностей передвижения влаги в зоне аэрации показали, что в зоне неполного насыщения выполняется модифицированный закон Дарси (закон Дарси для ненасыщенной фильтрации):

$$\vec{v} = -k_{w} \nabla H, \ H = z - \psi. \tag{4}$$

Величина  $k_w$  существенно зависит от влажности породы, уменьшаясь с уменьшением влажности, от значений коэффициента фильтрации k при полном насыщении до нуля при достижении влажностью значения, при котором фильтрация прекращается (влажность разрыва капилляров  $S_{\min}$ ). В отечественной литературе для зависимости коэффициента влагопереноса от относительной влажности используется формула Аверьянова [4]:

$$k_{w}/k = \overline{S}^{\gamma} \tag{5}$$

Для сравнительно гомогенных (однородных по структуре порового пространства) пород величина  $\gamma=3\div 4$ . На практике под каждую из аппроксимирующих ОГХ формул подбирают свою зависимость. Так, для ОГХ, аппроксимированных по формуле Брукса-Кори, обычно используют зависимость вида (2), при этом параметр  $\gamma=3+2/\lambda$ . При моделировании процессов влагопереноса в зоне неполного насыщения закон ненасыщенной фильтрации должен быть дополнен уравнением баланса влаги (уравнением непрерывности):

$$\phi(\partial s / \partial t) + \operatorname{div} \vec{v} = 0, \ \phi = \text{const}.$$
 (6)

Вместе с соответствующими граничными и начальными условиями уравнение (6), дополненное необходимыми замыкающими соотношениями (формулы Аверьянова, Ван-Генухтена или Брукса-Кори), образует замкнутую систему. Величину  $\phi s = W$  часто называют влажностью почвы или грунта. Необходимо отметить, что существует много публикаций по моделированию ненасыщенной фильтрации в почвогрунтах. Нас интересуют, прежде всего, вопросы капиллярного подъема воды в ненасыщенных пористых средах. Так, согласно [4], примем для капиллярного подъема в однородном по гранулометрическому составу почвогрунте (точка означает производную по времени)

$$\dot{h}_{\tau} = k \left( P - h_{\tau} \right) / h_{\tau}. \tag{7}$$

Интегрирование этого уравнения дает простую зависимость высоты капиллярного поднятия от времени:

$$t = -\frac{1}{k} \left[ h_{\tau} + P \ln \left( \frac{P - h_{\tau}}{P} \right) \right]. \tag{8}$$

Для неоднородного по размерам капилляров почвогрунта автор [4] получает зависимость вида:

$$t = (W_0 - W)Ch^3 / (9k). (9)$$

Вышеизложенная модель описывает процесс влагопереноса в недеформируемых почвах и грунтах. Однако такое приближение является не всегда оправданным, поскольку деформации влияют на форму капилляров и, следовательно, на капиллярное давление, а также на фильтрационные свойства почвогрунтов и, следовательно, на процесс

влагопереноса в целом. Нас будут интересовать деформации, вызванные процессом набухания. Математическая модель влагопереноса в деформируемых набухающих почвогрунтах была построена одним из авторов в [5]. При этом было доказано, что вместо уравнения (7) следует использовать уравнение:

$$-\partial [\phi(1-s)] / \partial t + \operatorname{div}(\vec{v}) + [1-\phi(1-s)] \partial \theta / \partial t = 0, \ \phi = 1 - V_s^0 / V = \phi_p + \phi_c.$$
 (10)

Заметим, что если деформациями пренебречь и считать  $\theta=0$ , то из (9) следует (5). Последнее замечание оказывается важным не только с методологической точки зрения, но и потому, что в проведенных нами экспериментах по капиллярному подъему влаги в набухающих почвогрунтах (см. ниже) увеличения объема среды в целом при капиллярном подъеме в набухающих почвогрунтах выявлено не было.

Далее нами было показано, что вызывающее набухание расклинивающее давление [6] в деформируемой ненасыщенной пористой среде, возникающее в набухающей фракции почвогрунта, связано с капиллярным давлением соотношением вида:

$$\Pi(h) + p = \sigma_g / (1 - \phi_p). \tag{11}$$

Для неглубоких (приповерхностных) почвенных горизонтов разумно считать  $\sigma_g = 0$ , так что соотношение (12) примет простой вид:

$$\Pi(h) = -p = \rho g \psi . \tag{12}$$

Толщина водной пленки h связана с  $\phi_c$ . Действительно, полагая, что текущий объем влаги в набухающей фракции равен  $V_c = h\Sigma_c$ , и разделив левую и правую часть последнего равенства на величину представительного объема среды  $V_0$ , получим

$$\phi_c = h\Sigma_c / V_0 = hu_c, u_c = \text{const}.$$
 (13)

Таким образом, из (5) — (12), используя (2) и (13), мы можем выразить водонасыщенность s через пористость  $\phi_c$  и перейти к решению соответствующей краевой задачи.

#### Изучение ненасыщенной фильтрации в набухающих породах

С целью изучения особенностей ненасыщенной фильтрации в набухающих почвогрунтах были проведены эксперименты по капиллярному всасыванию в образцы набухающих и ненабухающих почвогрунтов по единой методике. В качестве образцов ненабухающего грунта использовался лабораторный крупно- и мелкозернистый песок, в качестве образцов набухающих почв использовалась песчано-глинистая почва из Куркачей (Татарстан) с содержанием набухающей фракции (в основном монтмориллонит) 70 %. Образцы помещались в вертикальные колонки, нижний конец которых был в контакте с поверхностью воды. После приведения образцов в контакт с водой протекал процесс капиллярного подъема воды в вертикальных образцах почвогрунтов, причем наблюдения проводились за динамикой процесса впитывания влаги и капиллярного подъема. Общего увеличения объема почво-грунта В ходе эксперимента выявлено Экспериментальные данные по скорости капиллярного подъема приведены на рис. 2. При решении задачи о капиллярном подъеме в ненабухающих почвогрунтах оказалось, что полученные экспериментальные данные прекрасно описываются формулой (8) (рис. 2). Для задачи о ненасыщенной фильтрации в набухающих почвогрунтах, протекающей в условиях отсутствия изменения объема среды в целом, используем уравнение (9) в случае одномерной вертикальной фильтрации с учетом  $\theta = 0$ ,  $\phi = \text{const}$  (т.е. фактически уравнение (5)) вместе с законом Дарси для скорости ненасыщенной фильтрации (3). Тогда имеем

$$\phi \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{k_w}{\rho g} \frac{\partial}{\partial z} (p - \rho g z) \right], \ p = -\Pi(h), \ h = \phi_c / u_c \ . \tag{13}$$

В качестве граничного условия выбирался тот факт, что при z=o имеем  $\overline{S}=1$ . Далее задача решалась численно, причем для отслеживания движения границы зоны капиллярного

подъема использовалось значение  $\overline{S} = 0.98$ , после вычислялась координата этой точки в зависимости от времени. В качестве зависимости  $\Pi(h)$  использовалась зависимость из [6]:

$$\Pi(h) = Ah^{-q}; A, q = \text{const}.$$
 (15)

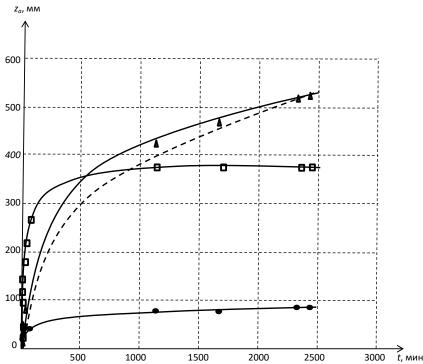


Рис. 2. Динамика изменения высоты капиллярного впитывания в песке различного гранулярного состава (квадратики соответствуют мелкозернистому песку, кружочки – крупнозернистому песку) и в набухающей почве (треугольники). Сплошными линиями показаны расчетные кривые. Пунктирной линией показана зависимость  $h_r = Bt^{1/3}$ , B = const [4].

#### Выводы

Разработанные модели и расчеты по ним показывают хорошее согласие с проведенными экспериментами. Это является достаточным основанием, чтобы говорить о новой единой концепции насыщенной и ненасыщенной фильтрации в набухающих горных породах.

- 1. Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.:  $\Gamma$ EOC, 2013. 576 с.
- 2. Khramchenkov E., Khramchenkov M. Modeling of non-equilibrium mass-exchange processes in geo systems // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2016. 86, P. 1–4.
- 3. Khramchenkov M.G., Khramchenkov E.M., Usmanov M.R. Non-linear equations of mechanics of swelling and metamorphic processes // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2019. V. 40, No. 12. P. 2077–2083.
  - 4. Судницын И.И. Экологическая гидрофизика почв: Часть 1. М.: МАКС Пресс, 2006. 60 с.
- 5. Galiullina N.E., Khramchenkov M.G. Some characteristic features of unsaturated swelling porous media // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. V. 88, No. 2. P. 293–298.
- 6. Нерпин С.В., Дерягин Б.В. Поверхностные явления в механике грунтов // Исследования в области поверхностных сил. М., 1961. С. 156–161.

## ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЖОРСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ И ПУТИЛОВСКОГО ПЛАТО В ИСТОРИЧЕСКОМ АСПЕКТЕ ОСВОЕНИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДА НОВГОРОДСКИХ ЗЕМЕЛЬ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-250-254

Цинкобурова М.Г., Норова Л.П.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, maschek@mail.ru, Norova LP@pers.spmi.ru

**Аннотация.** Описываемая область характеризуется как особая орографическая структура, соответствующая району развития терригенно-карбонатных пород ордовика. Проведенный анализ источников топонимического материала (средневековые писцовые книги и старинные карты северо-запада новгородских земель) подтверждает археологические данные об особенностях расселения славянского населения на северо-западе новгородских земель. Сделанная авторами корреляция топонимии местности с геологическими и гидрогеологическими особенностями региона показала важность геологических и гидрогеологических факторов при расселении населения в эпоху Средневековья.

**Ключевые слова**: топонимы, геологическое строение, подземные воды, карст, историческая география северо-запада России.

**Abstract.** The described area is characterized as a special orographic structure corresponding to the area of development of terrigenous-carbonate rocks of the Ordovician. The analysis of the sources of toponymic material (medieval scribal books and ancient maps of the north-west of the Novgorod lands) confirms the archaeological data on the features of the settlement of the Slavic population in the north-west of the Novgorod lands. The correlation of the toponymy of the area with the geological and hydrogeological features of the region made by the authors showed the importance of geological and hydrogeological factors in the settlement of the population in the Middle Ages.

Key words: toponyms, geological structure, groundwater, karst, historical geography of the north-west of Russia.

#### Введение

возвышенность и Путиловское плато расположены пределах Ижорская Ленинградской области, в восточной части обширного Ордовикского плато. Данное название представляет собой сложившийся в геологической и географической литературе по данному региону термин и обособляет область, являющуюся особой орографической структурой, соответствующей району развития терригенно-карбонатных пород ордовика, перекрытых относительно маломощным чехлом четвертичных отложений. На протяжении всего средневекового этапа эти районы, находящиеся на северо-западной окраине новгородских земель, являлись областью проживания преимущественно сельских жителей и именно сельские населенные пункты, как указывал Г.А. Исаченко [1], «составляли каркас освоения территории». На ранних этапах заселения природные факторы всегда играли ключевую роль. Какие природные аспекты оказались ключевыми при заселении севера новгородских земель, хорошо видно по археологическим и историко-географическим данным.

#### Состояние изученности

Первые работы по исторической географии данного региона датируются еще XIX веком. К.А. Неволин, изучив материалы новгородских писцовых книг, составил карту древних новгородских пятин [2]. Спустя полвека его работы продолжил для одной из пятин новгородских А.М. Андрияшев [3]. Данной работе способствовало издание императорской археографической комиссией новгородских писцовых книг в шести томах с 1859 по 1919 г. и представляющих уникальный материал для историко-географических и топонимических исследований. В этих книгах впервые были упомянуты многие селения края. Из современных работ можно в первую очередь назвать работы Г.А. Исаченко [1, 4], А.Г. Манакова [5], В.С. Жекулина [6], некоторые топонимические и исторические работы. Так, И.В. Стасюк [7] для Ижорской возвышенности проанализировал особенности средневекового расселения и связал их со спецификой почв региона. Однако особенности Путиловского плато с этой точки зрения не рассматривались, и сравнительный анализ этих двух областей Ордовикского плато с делан не был.

#### Историко-этнический аспект

Коренными насельниками северо-запада России были финно-угорские племена (протосаамы, сменившиеся вожанами, ижорами, карелами, вепсами), в VIII веке на эти земли с юга по долинам крупных рек (Волхова, Луги) мигрируют славяне. Отмечают, что финноугорское население предпочитало оконтуривающие Ижорскую возвышенность низменности, и заселение Ижорской возвышенности произошло только в X-XI века славянами [1]. Таким образом, Ижорская возвышенность явилась природным барьером на севере новгородских земель, обусловившим распространение ареалов обитания различных этносов (славян и финно-угров). Во времена Новгородской республики территория Ижорской возвышенности и Путиловского плато входила в состав Водской пятины Великого Новгорода. О ранних этапах заселения этой части Ордовикского плато свидетельствуют археологические материалы, а в новгородских писцовых книгах конца XV – начала XVI века даны уникальные сведения о населенных пунктах, примерном количестве населения, характере оброка, который платили жители. В Смутное время по итогам Столбовского мира (1617) вся территория Ижорской возвышенности и большая часть Путиловского плато перешли под власть шведской короны, сформировался отдельный регион Ингерманландия. Согласно условиям Столбовского мира, русское православное население покинуло территорию Ингерманландии, а на обезлюдевшие земли шведы переселили финнов из Южной и Юго-Финляндии, отсюда пошла особая субэтническая ингерманландцев. На протяжении XVII – первой трети XX века (вплоть до насильственного переселения финно-угорских народов в тридцатые годы и во время войны) именно финны являлись доминирующим этносом Ижорской возвышенности. Во время Северной войны край вернулся в состав России, начался новый этап заселения русскими. Сложившаяся в результате в регионе этническая и топонимическая картина характеризуется крайне большой пестротой и сложностью.

#### Топонимические и исторические свидетельства особенностей заселения региона

В вышеупомянутых работах И.В. Стасюка [7, 8] было отмечено тяготение центров погостов к периферийной, более хорошо дренируемой части Ижорского плато. И.В. Стасюк рассматривал запад Ижорской возвышенности как эпицентр первоначального заселения славянами, отмечая, что археологические данные (распространение курганно-жальничных могильников) тоже свидетельствуют о значении западной части Ижорской возвышенности как района начального славянского заселения.

Топонимические данные также подтверждают эти особенности, несмотря на сложности топонимии региона. Малые ойконимы, зафиксированные в писцовой книге Водской пятины, часто являются результатом достаточно сложной (порой и многократной) трансформации субстратных названий (русские суффиксы и т.д.), в то же время и многие исходно русские названия так же часто были изменены и приобрели финское звучание. В связи с этим выяснение этимологии и этнической принадлежности топонимов во многих случаях представляет определенную сложность. Тем не менее топонимический анализ малых ойконимов Ижорской возвышенности, упомянутых в новгородских и шведских писцовых книгах, позволяет проследить некоторые закономерности.

Для территории бывшей Ингерманландии наблюдается относительная стабильность поселений для западных погостов (Копорский и Ямской уезды). Во многих погостах этих уездов более половины деревень, впервые упомянутых в писцовой книге Водской пятины, сохранились до наших дней или до XX века. Центральные (Ореховский уезд) и восточные (Ладожский уезд) районы характеризуются утратой большинства деревень уже в XVII веке во время перехода этих земель во владение шведов.

При выяснении языковой принадлежности древних названий поселений обнаружено явное тяготение субстратных, финно-угорских ойконимов к западу Водской пятины — Никольский погост в Чюди, Воздвиженский Опольский и Егорьевский Радченский. В первых двух погостах более двух третей всех существующих названий деревень — финно-угорские, в Егорьевском Радченском погосте — соотношение финно-угорских и русских ойконимов

примерно одинаково. Все вышеуказанное свидетельствует об этнических особенностях региона — русское православное население тяготело к восточной части описываемого района, а финно-угорское — к западной. Миграция русских в начале XVII века привела к исчезновению многих селений центральных и восточных погостов севера Водской пятины.

Еще одной яркой топонимической особенностью Ореховского и Ладожского уездов, согласно данным писцовых книг, является явно незаконченный процесс формирования многих ойконимов, часто названия носят описательно-локативный характер [9] – Деревня на горе, Стехново Сидение на Полях, Великого князя ловии Александровские Самсонова на Васильев острову, Деревня на Покоселке в Павловской Люткина да в Ивановской же Захарьина и т.д., что может свидетельствовать в пользу формирования многих деревень относительно незадолго написания писцовых книг. Полученные до топонимическому анализу выводы подтверждают взгляды И.В. Стасюка о более поздней миграции славян из западных районов Ижорской возвышенности в восточном направлении. В то же время для древних топонимов Путиловского плато также наблюдается явное доминирование русских топонимов и достаточно большая утрата древних населенных пунктов, что подтверждает, что и этот район востока Ордовикского плато был областью славянской колонизации и утраты населенных пунктов, обусловленной миграцией православного населения на русскую территорию. Но, как и в ситуации запада Ижорской возвышенности, славянские топонимы, упоминаемые в писцовых книгах, здесь имеют вполне завершенный характер. Это может являться косвенным доказательством более раннего формирования населенных пунктов в восточной части Ладожского уезда (большая часть Путиловского плато) по сравнению с западом Ладожского уезда и Ореховским уездом (запад Путиловского плато).

# Геологические, географические и гидрогеологические условия региона, влияющие на характер заселения

Ижорская возвышенность представляет собой возвышенную западную часть Ордовикского плато, снижающуюся в северном направлении к Предглинтовой низменности (абсолютные отметки поверхности до  $+160\,$  м) (рис. 1). Общий равнинный характер Ижорской возвышенности осложняется отдельными грядами и холмами ледникового происхождения.



Рис. 1. Схематическая карта распространения орогидрографических зон Ленинградской области (по [10]).

Характерной особенностью Ижорской возвышенности (особенно ее центральной, наиболее возвышенной части) является широкое распространение поверхностных карстовых форм рельефа, которые способствуют переводу поверхностного стока в подземный сток (здесь практически отсутствует речная сеть). Реки формируются лишь на окраинах возвышенности, где их потоки образуются в местах естественной разгрузки подземных вод из карстовых источников [11]. К центральной части возвышенности приурочен водораздел правых притоков р. Луга и рек, впадающих в Финский залив или р. Неву (реки Стрелка, Шингарка, Черная, Систа и др.). На восточной окраине плато формируются источники реки

Ижора. В северо-западной части плато расположены два небольших озера, питающихся атмосферными осадками. Так как большая часть осадков расходуется на инфильтрацию, создаются благоприятные условия для питания подземных вод.

Путиловское плато (самая восточная часть Ордовикского плато) характеризуется более низкими абсолютными высотами (50–90 м), большей мощностью верхнеплейстоценовых ледниковых отложений и заболоченностью. Тем не менее и в этой части плато наблюдается много населенных пунктов, развито сельское хозяйство. В рельефе плато четко выделяются глубокие долины рек Волхова, Тосны, Сяси и других. Северной границей рассматриваемых земель является Балтийско-Ладожский уступ (глинт) (рис.1).

Ряд исследователей считает, что обособление в пределах Ордовикского плато отдельных возвышенностей, как и формирование на северо-западе Европы этой особой специфической орографической области, обусловлено структурно-тектоническим фактором – наличием серии концентрических и радиальных разломов (рис. 2). К многим радиальным разломам были приурочены участки долин крупных рек (Волхова, Луги). Долины этих рек разбивают единый комплекс Ордовикского плато на отдельные блоки и ограничивают эти блоки [11].

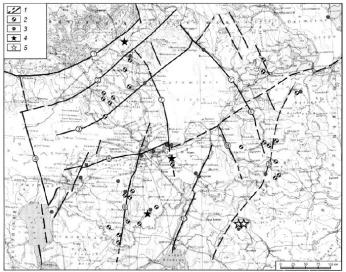


Рис. 2. Неотектонические разломы и связанная с ними минерализация: I — осевые линии зон разломов, 2—5 — минералого-петрографические доказательства наличия дизъюнктивов (проявления рудной минерализации, алмазов, флюидолитов) (по [11]).

Ограничение восточной части Ижорского плато серией ярко выраженных разрывных нарушений (Гатчинская зона нарушений,  $\mathbb{N}$  6 на рис. 2) способствовало обособлению двух частей востока Ордовикского плато (Ижорская возвышенность и Путиловское плато) с последующим формированием уникальных ландшафтов в этих двух районах, что обусловило несколько разный характер расселения. Наличие системы крупных водотоков, текущих в северо-западном и северо-восточном направлении в сторону базисов эрозии (Финский залив для Луги и Нарвы, Ладожское озеро для Волхова), способствовало быстрой миграции славян из более южных районов на север. Расселение на востоке Ордовикского плато шло и с востока (от Волхова на Путиловское плато), и с запада (от Луги, Нарвы на Ижорскую возвышенность).

Геологическое строение хорошо объясняет, почему на Ижорской возвышенности мало рек, озер и даже болот. Рассматриваемая территория хорошо дренируется, так как подстилающими породами является мощная ордовикская карбонатная толща. На таком геологическом субстрате формируются довольно плодородные дерново-карбонатные почвы, что делает область Ордовикского плато благоприятной для сельского хозяйства [12]. Относительная безводность Ижорской возвышенности по сравнению с прилегающими низменностями не способствовала привлекательности этого района для коренного населения

этих мест – финно-угров, промышлявших, в первую очередь, охотой и рыболовством. Для наоборот, меньшая пришедших земледельцев-славян, заболоченность возвышенности и наиболее плодородные в этой местности дерново-карбонатные почвы делали и Ижорскую возвышенность, и Путиловское плато наиболее перспективными для земледельческого освоения, в результате чего с XII по XIV век плато оказалось одним из густонаселенных районов Новгородской земли c хорошо земледельческим хозяйством [7, 8]. Однако внутренние районы Ижорской возвышенности и Путиловского плато (удаленные от главных водотоков) заселялись позднее, что подтверждается топонимическими, историческими и археологическими данными.

Следует отметить, что Ижорская возвышенность является региональной областью питания водоносных подразделений в пределах северо-западного крыла Ленинградского артезианского бассейна. Движение подземных вод от области питания направлено к периферии плато, где происходит их разгрузка родниками. Дренирование осуществляется по линии Балтийско-Ладожского уступа и долинам рек, где имеются многочисленные родники. Водообильность карбонатной серии (Ордовикский водоносный комплекс), в целом, очень высокая, но неравномерная по площади. В пределах этой зоны выделяются участки напорной и нисходящей разгрузки. Вдоль глинта происходит нисходящая разгрузка, напорная же разгрузка наблюдается вдоль рек восточной и южной части плато. Подземные воды повсеместно пресные, гидрокарбонатные магниево-кальциевые или кальциево-магниевые, умеренно жесткие с нейтральной реакцией среды [13]. Анализ расположения древних поселений в пределах приглинтовой части Ижорской возвышенности, соответствующей зоне максимальной разгрузки подземных вод, показывает сгущение поселений, при этом многие названия поселений отражают гидрологические и гидрогеологические особенности местности, названия поселений часто соответствуют русским или финно-угорским местным диалектным терминам, обозначающим родники: Кипень, Каложицы, Тайцы, Большая Вруда и река Рудица, Алапурская, Юля-Пурская, Покизен-Пурская, Новая Буря и урочище Старая Буря, Пулково (Цинкобурова, Норова, в печати).

- 1. Исаченко Г.А. «Окно в Европу»: история и ландшафты. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 1998. 476 с.
- 2. Неволин, К.А. О пятинах и погостах новгородских в XVI веке. СПб.: Тип. Имп. Акад. наук, 1853, XII. 415 с.
- 3. Андрияшев, А.М. Материалы по исторической географии Новгородской земли. Шелонская пятина по писцовым книгам 1498–1576 гг. Т. 1 Списки селений. Т. 2 Карты погостов. М.: Издание Императорского общества истории и древностей российских при Московском университете, 1914. 611 с.
- 4. Волкова, Е.А., Исаченко Г.А. Еловые леса Ижорской возвышенности (ленинградская область): типология и современное состояние // Растительность России. 2018. 33. С. 41–52
- 5. Manakov A., Andreev G. Acultural and landscape zoning in the North-West Russia //Ehtnocultural differentiation of territories. P. 109–116
  - 6. Жекулин В.С. Историческая география ландшафтов. Новгород, 1972. 228 с.
- 7. Стасюк И.В. Средневековое расселение на западе Ижорского плато: Ратчинский и Льешский погосты Водской пятины // Новгород и Новгородская земля. История и археология. Вып. 33. Великий Новгород, 2020. С. 148–154.
- 8. Стасюк И.В. О родниках, мечах и погостах // Заметка к исторической географии запада Новгородской земли. Stratum plus // Археология и культурная антропология. 2014. №5. С. 297–303.
- 9. Новгородские писцовые книги, изданные археографической комиссией. Переписная оброчная книга Вотской пятины 1500 года. Первая половина СПб.: Тип. В. Безобразова и комп. Т. третий, 1868. 488 с.
- 10. Геология СССР. Т 1. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. Часть 1. Геологическое описание / Под ред. В.С. Кофмана, В.А. Селивановой. М.: Недра, 1971. 504 с.
- 11. Афанасов М.Н. Неотектоника и голоценовые проявления золота, самородной ртути и других эндогенных минералов в Ленинградской области // Отечественная геология. 2011. № 2. С. 55–59.
- 12. Гагарина Э.И. Литологический фактор почвообразования (на примере северо-запада Русской равнины) / СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. 260 с.
- 13. Жданов С.В., Куриленко В.В. Проблемы водопользования Ижорского месторождения подземных вод // Записки Горного института. 2013. № 200. С. 216–221.

### УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЕНГОРБОЙСКОГО ТЕРМАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-255-258

Чернявский М.К., Плюснин А.М. Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, mitchel1977@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены геологические условия формирования Енгорбойского источника азотных термальных вод в пределах восточных склонов Джидинского хребта. Наличие кембрийских и раннепалеозойских образований является основной особенностью пород Джидинского хребта. Показаны особенности химического состава и температурного режима вод источников. Максимальная температура гидротерм на глубине формирования составляет 89.3 °С, глубина формирования 2.9–3.6 км. Теплые и холодные источники относятся к одной группе, характеризуемой разной степенью разбавления в приповерхностных условиях.

Ключевые слова: гидротермы, бактериальные маты, геологическое строение, разломы.

**Abstract.** The geological conditions of the formation of nitrogen thermal Engorboy springs within the eastern slopes of the Dzhida ridge are considered. The presence of Cambrian and Early Paleozoic formations is the main feature of the rocks of the Dzhida Range. The features of the chemical composition and the temperature regime of the source waters are shown. The maximum temperature of hydrothermal waters at the formation depth is 89.3°C, the formation depth is 2.9–3.6 km. Warm and cold sources belong to the same group, characterized by varying degrees of dilution in the near-surface conditions

Keywords: hydrotherms, bacterial mats, geological structure, faults.

Енгорбойский источник азотных кремнистых термальных вод относится к Восточно-Саянской области провинции термальных вод. Группа выходов теплой (31.0–41.6 °C) и холодной воды (12°C) находится в 50 км от г. Закаменска и в 2 км к юго-востоку от улуса Енгорбой, в верхнем течении р. Джида, в долине р. Аршан, в 2,5 км от ее устья, в узкой вытянутой долине северо-западного простирания. Долина врезана в коренные породы на 200-300 м и имеет вид ущелья. Координаты 50 °32 с.ш. 102 °51 в.д. Абс, отметки 1216 – 1300 м. Дата отбора проб – июль 2007 г. Источник используется жителями Закаменского района для лечебных целей. Около выхода источника построены двухэтажные дома для отдыхающих, столовая, медпункт, ванные, баня и душевые.

Разгрузка терм происходит двумя группами родников в 0.4–0.5 км одна от другой с юго-востока на северо-запад (рис. 1). Общий расход источника достигает 2.0–2.5 л/с, температура воды -28–40 °C, в газовом составе преобладает азот, содержание радона -48 эман. Дебит каждого выхода источника от 0.1 до 1.0 л/с.

Наиболее высокотемпературные воды разгружаются на правом берегу р. Аршан. Самыми высокотемпературными являются «Божественный источник» (t = 41.6 °C, pH 8.26, дебит 0.1 л/с), выходящий из под скального обнажения гранита, и Горячий источник (ванна; t = 38.3 °C, pH 7.4, дебит 1 л/с). Интенсивность разгрузки источников различная, наибольшая активность в районе зубного, глазного, ушного, желудочного аршанов, представляющих единую группу выходов на левом берегу р. Аршан.

Формула Курлова для «Божественного источника»:

$$M1.32 \frac{SO_477Cl12HCO_311}{Na93Ca7} pH8.2T41.6.$$

Вода гидрокарбонатно-хлоридно-сульфатная кальциево-натриевая.

Параметры других выходов термального источника: «От изжоги» – t 34.4 °C, pH 8.32; «5 источников» – t 31.9 °C, pH 7.98; «Аршан – почки, поясница» – t 31.4 °C, pH 8.49.

Отдельно располагается группа зубного, глазного, ушного, желудочного источников. В отличие от остальных, эти источники являются холодными – t = 12,1°C, они располагаются в наиболее низкой части поля, абс. отметка составляет 1216 м. Разгрузка происходит в подножии крутого склона у скального обнажения гранита. Суммарный дебит низкий, не более  $1\ n/c$ .

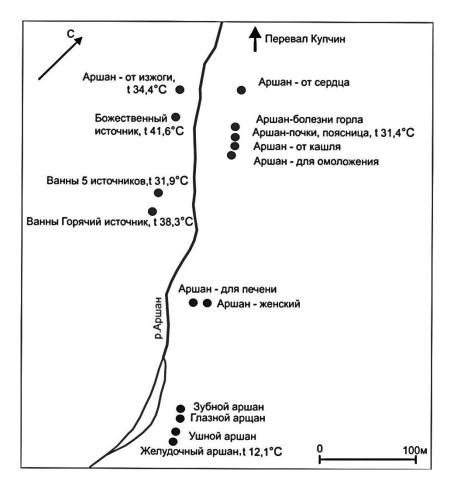


Рис. 1. Схема расположения выходов Енгорбойского источника.

По химическому составу воды Енгорбойского источника сульфатно-натриевого типа (таблица) близки к водам Ниловой Пустыни.

 						/
<b>\</b> /I	акрокомпонентный соста	D DOT	DITYOTOD	TONMOUT HOLO	ILCTOILLIATE	NATC/TI
VI.	акиокомпонентный соста	IB BU/I	BBIAU/IUB	TCDWallbhold	источника.	IVI 1 / J I

Название источника	T, °C	pН	TDS	K+Na	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	F	H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>
«Божественный»	41.6	8.26	1322. 74	405.77	27.56	0.24	122.03	686.7	80.48	9.59	91.21
«От изжоги»	34.4	8.32	1221.87	350.59	28.56	1.22	122.03	589.2	74.81	7.81	75.59
«Поясница»	31.4	8.49	1003.41	274.96	24.55	5.47	120.51	481	47.86	4.51	65.04
«Желудочный»	12.1	8.75	729.01	184.61	25.06	4.86	125.09	279.17	44.67	3.76	66.41

Считается, что при быстром подъеме термальных вод к земной поверхности содержание кремниевой кислоты остается неизменным. Так как растворимость кварца зависит от температуры, она соответствует максимальной температуре, существующей на максимальной глубине проникновения термальных вод  $(t_h)$ . Зная содержание кремниевой кислоты можно вычислить температуру гидротерм  $({}^{\circ}C)$  по формуле [1]. Для низкотемпературных малодебитных гидротерм она имеет следующий вид (1):

$$tsio_2 = [1051.1/(4.655 - lgsio_2)] - 273.15.$$
 (1)

Значения, полученные с помощью кремниевого геохимического термометра, соответствуют глубинам формирования основной части термальных вод, которые определяют химический облик и тепловые характеристики гидротерм [2].

Таким образом, переведя содержание  $H_4SiO_4$  в  $SiO_2$ , получаем следующие значения температуры воды на глубине формирования: «Божественный» — 89.3 °C, «От изжоги» — 77 °C, «Поясница» — 72 °C, «Желудочный» — 73.2 °C.

Используя полученные значения глубинных температур  $t_h$  и величину регионального геотермического градиента  $\gamma=25$  °C/км [2], можно рассчитать глубину формирования гидротерм по формуле  $h=t_h/\gamma$ . Получаем следующие значения: «Божественный» — 3.6 км, «От изжоги» — 3.1 км, «Поясница» — 2.9 км, «Желудочный» — 2.9 км.

Таким образом, холодные и теплые выходы источника, несмотря на разницу температур на выходе, с высокой долей уверенности можно считать однотипными, только холодные в приповерхностных условиях подвергаются разбавлению грунтовыми и поверхностными водами.

Формирование водных ресурсов источника происходит в достаточно сложной геологической обстановке (рис. 2). Химический состав воды формируется при взаимодействии с интрузивными и эффузивными горными породами различного возраста [3]:

 $\gamma_3 P_2 b$  — Бичурский комплекс габбро-монцонит-гранитовый: третья фаза — граниты и лейкограниты умеренно-щелочные, граносиениты. Данные изотопно-геохронологических исследований пород бичурского комплекса большей частью соответствуют пермскотриасовому возрасту.

 $\mu_2 P_2 b$  — вторая фаза — кварцевые сиениты, кварцевые монцониты, сиениты и монцониты пермского возраста.

 $\delta$ - $\gamma PZ_1 d$  — Джидинский комплекс диорит-гранитовый — гранодиориты, тоналиты, кварцевые диориты, диориты, плагиолейкограниты раннепалеозойского возраста.

 $\varepsilon_{1-2}$ hh+hs — Хохюртовская свита и хасуртинская толща объединенные — эффузивы, преимущественно основного состава, их туфы и кластолы, силициты, доломиты, известняки с прослоями кремнисто-карбонатных сланцев, алевролиты и аргиллиты. Возраст хохюртовской свиты принят как ранний — средний кембрий.

 $\nu PZ_1z$  — Зунгольский комплекс габбро-норитовый — габбро, габбро-нориты. Возраст габброидов зунгольского комплекса принят как раннепалеозойский.

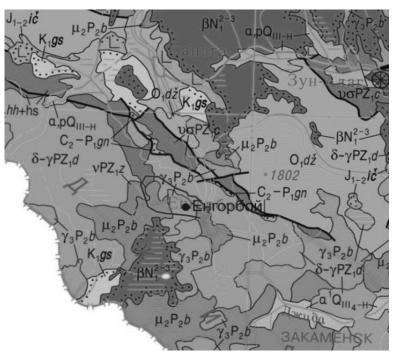


Рис. 2. Геологическое строение района расположения Енгорбойского источника азотных термальных вод.

В целом в районе преобладают древние хрупкие кристаллические породы палеозойской эры, которые разбиты разрывными нарушениями северо-западного направления. Определяющим фактором формирования термального источника является трещиноватость пород, связанная с вздыманием массива. В результате этого сформировались открытые разрывные нарушения, по которым происходит движение термальной воды.

Разгрузка термальных источников происходит в местах пересечения их разломами субширотного направления. Трещиноватость пород была сформирована в результате протекания горообразовательных процессов в пермский период и подновлена при внедрении гранитоидов в триасовый период мезозойской эры. Вздымание этого блока пород продолжается в современную эпоху, и разломы остаются открытыми для проникновения вод на глубину 2–3 км.

#### Заключение

Енгорбойский источник представляет из себя группу теплых и холодных родников единого генезиса, с глубиной формирования 2.9–3.6 км, различной степени разбавления холодными водами. Формирование термальных вод происходит в зоне трещиноватости, образованной при вздымании массива палеозойских интрузивных пород в период горообразования в пермский период и обновленной при внедрении мезозойских гранитоидов. По химическому составу воды относятся к гидрокарбонатно-хлоридносульфатным кальциево-натриевым, газирующим азотом с температурой до 42 °C.

Воды источника и илы используются для лечения заболеваний сердечно-сосудистой системы, ревматизма, гипертонии, опорно-двигательного аппарата и периферической нервной системы, остаточных явлений полиомиелита у взрослых, остеохондроза. Здесь также лечат заболевания щитовидной железы, обмена веществ, последствия травм головы, воспаления головного и спинного мозга после энцефалита, гинекологические, кожные болезни.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ГИН СО РАН по проекту AAAA-A21-121011890033-1. Геоэкологические риски и экстремальные природные явления Сибири и Дальнего Востока.

- 1. Ильин В.А., Кононов В.И., Поляк Б.Г., Козловцева С.В. Оценка глубинных температур с помощью гидрохимических показателей // Геохимия. 1979. № 6. С. 888–901.
- 2. Голубев В.А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Гео, 2007. 222 с.
- 3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Алдано-Забайкальская серия. Лист М48 Улан-Удэ. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 200 зубного, глазного, ушного, желудочного 9. 271 с.

# III. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ И МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-259-263

# НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГИГАНТСКИХ НАЛЕДЯХ-ТАРЫНАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

Алексеев В.Р. $^1$ , Макарьева О.М. $^{1,4}$ , Шихов А.Н. $^2$ , Нестерова Н.В. $^{1,3}$ , Землянскова А.А. $^{1,4}$ , Осташов А.А. $^1$ 

<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения СО РАН, Якутск, Snow@irk.ru, omakarieva@gmail.com <sup>2</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь <sup>3</sup>Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург <sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

**Аннотация.** Приводятся новые сведения о географическом распространении и многолетней динамике наледей подземных вод (тарынов), полученные на основе серийных космических снимков Landsat и Sentinel-2. Освещается структура и содержание составленного Атласа гигантских наледей-тарынов северо-востока России.

**Ключевые слова**: вечная мерзлота, наледи (тарыны), наледные ресурсы, динамика наледей, картографирование наледей.

**Abstract**. New data on geographical distribution and long-term dynamics of aufeis (taryns) are obtained on the basis of serial space images Landsat and Sentinel-2. The structure and the content of the developed Atlas of giant aufeis of the North-East of Russia are presented.

Key words: Permafrost, aufeis (taryn), aufeis resources, dynamics of aufeis, mapping aufeis.

#### Постановка задачи

Наледи-тарыны характеризуют динамические запасы подземных вод. Они регулируют поверхностный и подземный сток, являются важнейшим элементом в цепи водообменных процессов криолитозоны. Изучением наледей подземных вод северо-востока России с середины XIX столетия занималась большая группа ученых (А.Ф. Миддендорф, Г.Л. Майдель, С.А. Подъяконов, П.К. Хмызников, П.Ф. Седов, В.П. Седов и др.). В региональном плане наиболее обстоятельные исследования впервые осуществили геологи А.С. Симаков и 3.Г. Шильниковская, составившие Кадастр и Карту распространения 7448 ледяных полей. Для этого использовались черно-белые аэрофотоснимки [1, 2]. В дальнейшем полученные материалы легли в основу нескольких монографий, освещающих проблемы гидрогеологии, речного стока и оледенения северо-восточной части Азиатского континента [3–6]. С тех пор прошло 50-70 лет. За это время появилась обширная аэрокосмическая информация, позволяющая существенно скорректировать представления о динамике наледных явлений и их роли в формировании геолого-географической среды. Авторы поставили перед собой следующие задачи: 1) на основе изучения серийных космических снимков создать современную геоинформационную базу данных о наледях и наледных процессах; 2) составить атлас гигантских наледей-тарынов северо-востока России; 3) рассчитать объем наледных ресурсов в регионе и оценить их пространственно-временную изменчивость.

#### Методы исследования

картографирования наледей использовались два основных информации: Карта и Кадастр наледей северо-востока СССР [1, 2] и спутниковые снимки Landsat-1, сенсор MSS (1973–1974 гг.), Landsat-8 (2013–2019 гг.), Sentinel-2 (2019 г.). Характеристики наледей из Кадастра (1958 г.) были оцифрованы и привязаны к топографическим картам масштаба 1:200000, что обеспечило точность местоположения ледяных массивов в пределах 100 м. Современные размеры тарынов и их географическое положение определялись по снимкам со спутника Landsat-8 (радиометр OLI), полученным после схода снежного покрова. Выбор дат съемки производился таким образом, чтобы выделить максимально возможное количество наледей, так как в июне происходит их интенсивное разрушение. Всего было обработано более 100 сцен. Самая ранняя из выбранных дат съемки — 15 мая, самая поздняя — 26 июня. Снимки загружались с веб-сервиса Геологической службы США (http://earthexplorer.usgs.gov). При картографировании наледей использовались снимки за период с 2013 по 2019 г., выбранные по оптимальным характеристикам облачности и дате съемки. Более 50 % всех данных о наледях получены по материалам съемок, выполненных с 31 мая по 6 июня 2016 г. В этот период наблюдалась наиболее устойчивая малооблачная погода. Методика выделения наледей на снимках Landsat описана в работе [7]. Предварительная обработка снимков (пересчет из яркостей в коэффициенты отражения) осуществлялась средствами модуля Semi-Automatic Classification Plugin в программе Qgis 2.18. Алгоритм выделения наледей реализован в пакете ArcGis с помощью приложения ModelBuilder.

Для исключения ошибочно выделенных объектов, а также пропусков наледей проведена сплошная верификация результатов автоматизированного дешифрирования снимков. Она включала уточнение контуров наледей (где необходимо), удаление покрытых снегом областей, прилегающих к наледям, удаление прочих ледовых объектов (таких, как покрытые льдом озера или русла безналедных рек), а также объединение наледей, разделенных в процессе таяния на несколько смежных участков. Если расстояние между наледями в пределах одной долины (наледной поляны) не превышало 150 м (5 пикселей Landsat), такие участки считались частями одной наледи. Характеристики наледей, полученные в результате дешифрирования поздних космических снимков, приводились к максимальным значениям, наблюдаемым перед началом их разрушения. За основу был взят метод Б.Л. Соколова [4], позволяющий рассчитать уменьшение относительных значений площадей наледей различного размера в течение теплого периода года в зависимости от числа дней после начала таяния. В расчетах использовались следующие данные: размер наледи, определенный по космическому снимку, дата съемки, абсолютная высота положения наледи, ряд суточной температуры воздуха ближайшей метеорологической станции за год получения снимка, а также абсолютная высота метеорологической станции. Для учета неоднородности распределения температуры воздуха в горных условиях учитывался градиент температуры воздуха, среднее значение которого в мае и июне принято равным -0.85 °C на 100 м относительного превышения. Количество дней таяния определялось для каждой наледи по данным ближайшей метеостанции за год, в который эта наледь была идентифицирована. В качестве начала периода таяния принималась дата устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °C в сторону повышения. Самая ранняя дата начала таяния определилась 23 апреля в бассейне р. Колымы, а самая поздняя – 12 мая в бассейнах рек Чукотского полуострова. Для оценки скорости разрушения наледей разного размера использовались номограммы, приведенные в работе [4]. В результате расчетов получены уточненные размеры 6683 наледей северо-востока России на период их максимального развития. Общая площадь тарынов составила 4529 км<sup>2</sup>, т.е. увеличилась на 22 % по сравнению с данными, снятыми с космических снимков.

#### Результаты работ

В итоге проведенных работ составлены электронный Атлас гигантских наледейтарынов северо-востока России и четыре базы данных о наледях по основным бассейнам рек – Яна, Индигирка, Колыма и Анадырь (базы данных находятся на государственной регистрации). В базе данных имеются сведения о запасах наледного льда. Атлас наледей состоит из двух частей – иллюстративно-аналитической и картографической. В первой части освещается история изучения наледей-тарынов, описывается их происхождение, форма, размеры, строение, изменчивость во времени и пространстве, раскрывается зависимость мерзлотно-гидрогеологических, ледяных массивов гидроклиматических, геоморфологических и геотектонических условий. Во второй части помещено 90 карт распространения наледей-тарынов по бассейнам рек Яна, Индигирка, Колыма, Анадырь, Пенжина и др. На картах отражено современное положение и размеры около 7000 ледяных полей, ежегодно формирующихся в результате излияния подземных вод. Примеры карт наледей одного из бассейнов показаны на рис. 1.

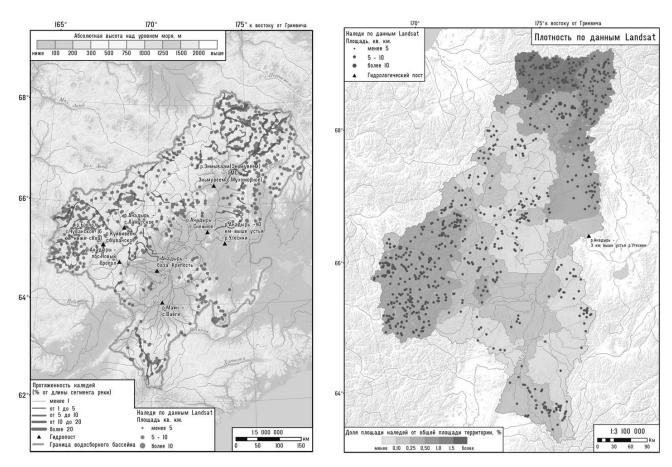


Рис. 1. Наледи-тарыны в бассейне р. Анадырь.

Многолетняя изменчивость размеров наледей и их распределение по высотным поясам отражены на гистограммах, в таблицах, раскрыты в кратких пояснительных текстах.

Выполнена оценка многолетней изменчивости размеров 13 гигантских ледяных массивов, расположенных в разных частях региона. Особый интерес представляют сведения по двум крупнейшим объектам: Большой Момской наледи, формирующейся в долине р. Мома (по данным Кадастра F=82 км²), и группе наледей в бассейне левого притока р. р. Сюрюктях (общая площадь по данным Кадастра достигает 288 км<sup>2</sup>). Для Индигирки определения параметров наледей использованы безоблачные снимки со спутников Landsat-5 (TM), Landsat 7 (ETM+) и Landsat-8 (OLI) с датами съемки между 1 мая и 30 июня в период 2001–2017 гг. За это время площадь Момской наледи перед началом ее разрушения изменялась от  $66.2 \text{ км}^2 \text{ в} 2005 \text{ г.}$  до  $21.9 \text{ км}^2 \text{ в} 2017 \text{ г.}$ , т.е. сокращалась в три раза. Группа Сюрюктяхских наледей достигла максимума (268 км<sup>2</sup>) в 2012 г., а минимума (69.7 км<sup>2</sup>) в 2002 г. Определенной закономерности в межгодовой изменчивости наледей не обнаружено. Средняя площадь Момской наледи за восемь лет наблюдений указанного периода составила  $46.8 \text{ км}^2$ , а группы Сюрюктяхских наледей –  $146.5 \text{ км}^2$ . Кроме того, на основе изучения серийных космоснимков проведена оценка внутригодовой динамики наледей в период их таяния. Построены картограммы изменения площади наледей на реках Сюрюктях, Мома, Адыча, Улахан-Саккырыр, Сугун, Ильгувем, Анмангында, Тарюрер, Пыкарваал, Нядбаки и др. Установлено, что в процессе таяния гигантские ледяные массивы распадаются на ряд блоков сложной конфигурации. Наиболее долго сохраняются блоки мощностью 3-5 м, расположенные вблизи зоны разгрузки подземных вод. Некоторые из них перелетовывают, т.е. включаются в цикл развития следующего года.

Полученные данные о размерах наледей в период их максимального развития (перед началом активного снеготаяния) позволили рассчитать суммарные ежегодные запасы наледного льда, а также построить карты наледных ресурсов (рис. 2).

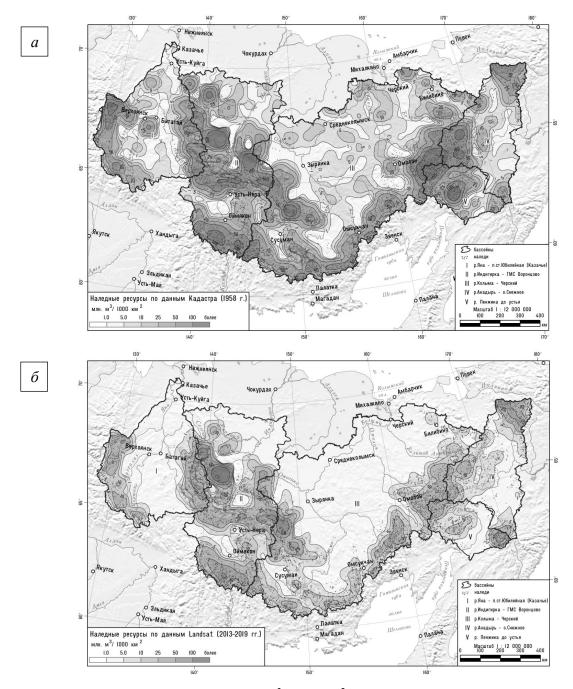


Рис. 2. Объем наледей подземных вод ( ${\rm M}^3/1000~{\rm km}^2$ ) на северо-востоке России, рассчитанный: a — по кадастру А.С. Симакова и З.Г. Шильниковской [1, 2],  $\delta$  — по современным данным, полученным в результате дешифрирования космических снимков Landsat и Sentinel-2.

В расчетах использовалась формула из работы [5]:  $W = \alpha F^n$ , где W и F — объем и площадь наледи, тыс.  $M^3$  и тыс.  $M^2$  соответственно;  $\alpha$ =0.75 и n=1.12 — эмпирические коэффициенты. Параметры формулы получены на основе анализа полевых данных о средней мощности наледей подземных вод разных размеров. Средняя мощность наледей площадью F<0.001 к $M^2$  составляет 1 м, мощность наледей других размеров постепенно увеличивается и при F=100 к $M^2$  составляет около 3 м.

Характеристика наледных ресурсов в основных бассейнах рек северо-востока России представлена в таблице. Наибольшие запасы наледного льда ( $W=4.25~\rm km^3$ ) формируются в бассейне р. Индигирка ( $F=1663~\rm km^2$ ). В бассейне р. Колыма объем наледей почти в два раза меньше ( $W=2.2~\rm km^3$ ), хотя площадь водосбора вдвое больше ( $F=663000~\rm km^2$ ). Здесь же зафиксирована и наименьшая наледность территории (0.19~%), что объясняется большим количеством низменных территорий, где наледи подземных вод практически не встречаются.

В целом на северо-востоке России в условиях современного климата ежегодно формируется не менее 10.6 км<sup>3</sup> наледного льда, что соответствует примерно пяти мм слоя наледного стока.

Наледные ресурсы основных бассейнов рек северо-востока России

Река	Площадь	Наледность,	Площадь	Объем	Запас воды в
Гска	бассейна, км <sup>2</sup>	%	наледей, км <sup>2</sup>	наледей, км <sup>3</sup>	наледях, мм
Яна	224000	0.23	505	1.1	4.5
Индигирка	305000	0.55	1663	4.25	1.1
Колыма	643000	0.19	981	2.2	3.0
Пенжина	73500	0.26	189	0.4	5.1
Анадырь	156000	0.26	398	0.85	5.1
Амгуэма	26400	0.39	192	0.2	7.5
Всего	1427900		3838	9.0	
Среднее		0.31			4.4

#### Обсуждение

c.

Атлас и базы данных гигантских наледей-тарынов открывают новый этап в изучении феноменального явления криосферы Земли. Представленные материалы фиксируют местоположение и размеры ледяных массивов спустя 50–70 лет после их первой регистрации на черно-белых аэрофотоснимках в конце 1940-х гг. Полученные характеристики наледей, в том числе сведения о погодовой изменчивости некоторых гигантских ледяных полей, пока еще не анализировались. Однако даже беглый просмотр источников информации и их сравнение с данными прошлых лет свидетельствуют о больших изменениях в общей картине наледности региона. Есть надежда на то, что последующее изучение составленных карт, графиков и баз данных принесет новые практически важные результаты, а сам Атлас с приложением количественных характеристик ледяных полей станет стартовым источником информации для их разностороннего исследования и долгосрочного мониторинга криолитозоны.

Работа выполнена по проектам РГО № 26/2019-И и РФФИ 20-05-00666.

- 1. Шильниковская З.Г. Кадастр к Карте наледей северо-востока СССР масштаба 1:2000000, составленной А.С. Симаковым и З.Г. Шильниковской. Магадан: Северо-Восточное территориальное геологическое управление. Центральная комплексная тематическая экспедиция, 1958. 398 с.
- 2. Симаков А.С., Шильниковская З.Г. Карта наледей северо—востока СССР масштаба 1:200000. Магадан: северо-восточное территориальное геологическое управление, Центральная комплексная тематическая экспедиция, 1958. 40 с.
- 3. Толстихин О.Н. Наледи и подземные воды северо-востока СССР. Новосибирск: Наука. Сиб. Отд-ние, 1974. 164 с.
  - 4. Соколов Б.Л. Наледи и речной сток. Л.: Гидрометеоиздат, 1975. 190 с.
  - 5. Соколов Б.Л., Саркисян В.О. Подземное питание горных рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 239 с.
  - 6. Корейша М.М. Оледенение Верхоянско-Колымской области. М.: Междувед. геофиз. ком., 1991. 143
- 7. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным // Лёд и снег. 2019. Т. 59, № 2. С. 201–212.

# МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА НАЛЕДЕЙ НА ФЕДЕРАЛЬНОЙ АВТОДОРОГЕ А-360 «ЛЕНА» НА ОТРЕЗКЕ ИЕНГРА – ЧУЛЬМАН

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-264-266

#### Баишев Н.Е.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, nyurgunbaishev@mail.ru

Аннотация. Приводятся результаты исследований многолетней динамики наледей на федеральной автомобильной дороге A-360 «Лена» (ФАД «Лена») на отрезке Иенгра — Чульман (Южная Якутия) за прошедшие 90 лет ее эксплуатации. Использованы данные В.Г. Петрова [2] и В.Р. Алексеева [3], а также мультиспектральные космические снимки Sentinel-2. В результате проведенных исследований установлено, что за 90 лет эксплуатации автодороги увеличились суммарная площадь и суммарная протяженность наледей, а также возросла наледная опасность на притрассовой полосе ФАД «Лена» от р. Иенгра до р. Чульман.

**Ключевые слова:** наледь, динамика наледей, Sentinel-2, Южная Якутия, автомобильная дорога «Лена».

**Abstract.** This paper presents the results of a study of the long-term dynamics of icing (naled) on the Lena Highway on the Iengra-Chulman section (South Yakutia, Russia) over the past 90 years. Used data from V. Petrov [2] and V. Alekseeva [3], as well as Sentinel-2 multispectral satellite images. As a result of the studies, it has been established that over 90 years of operation of the road, the total area and the total length of naledes have increased, and the naled hazard has also increased on the roadside strip of the Lena Highway in the Iengra-Chulman section.

Key words: icing, dynamics of groundwater icing, Sentinel-2, South Yakutia, Lena Highway.

В криолитозоне строительство, эксплуатация и реконструкция крупных линейных сооружений вызыва.т существенные изменения мерзлотных, ландшафтных, гидрологических, гидрогеологических и других природных условий. Эти изменения могут способствовать активизации существующих наледеобразовательных процессов, вызвать формирование новых наледей, которые представляют большую опасность для линейных инженерных сооружений, в том числе для федеральной автомобильной дороги А-360 «Лена».

ФАД «Лена» имеет важное значение для Республики Саха (Якутия), поскольку является ее основной автотранспортной артерией, связывающей прилегающие южные и центральные районы республики с Транссибирской и Байкало-Амурской железнодорожными магистралями. По ней в Якутию доставляются продовольственные, промышленные и медицинские товары, а также осуществляется основной поток пассажирских перевозок [1].

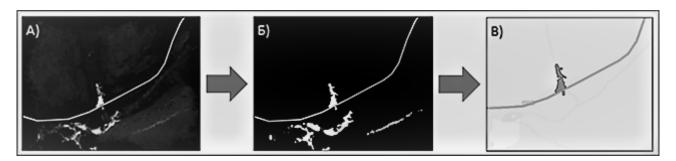
Исследование В.Г. Петрова зимой 1927–1928 гг., в период строительства и эксплуатации Амуро-Якутской магистрали (ныне ФАД «Лена»), показало, что основными причинами нарушения устойчивости дорог и мостов являются наледи [2]. В дальнейшем автодорога «Лена» неоднократно реконструировалась, причем менялись ее километраж и трассировка.

По данным В.Р. Алексеева (1959–1960 гг.), минимизация негативного воздействия наледей до конца не была решена. Причины заключались в том, что применялись пассивные и малоэффективные способы, такие как чистка наледного льда и сооружение водоотводных канав во льду. Достаточно большие изменения в направлении и протяженности автодороги, а также изменения природных условий привели к тому, что предложенные В.Г. Петровым способы возведения противоналедных сооружений для большинства наледеопасных участков сегодня применяться не могут [3].

В настоящее время ФАД «Лена» имеет протяженность 1157 км (Невер – Якутск). На ней расположено 111 мостов (79 из них оборудованы антисейсмическими упорами) и 1024 водопропускных труб. С 2010 г. началась очередная крупная реконструкция ФАД «Лена» в рамках подпрограммы «Автомобильные дороги» федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России (2010–2021 гг.)» [4]. Эффективная реализация данной подпрограммы обеспечит социально-экономическое развитие не только Якутии, но и всего северо-востока страны и Забайкалья.

Целью проводимых исследований является оценка многолетней динамики наледеобразования на ФАД «Лена» от р. Иенгра до р. Чульман.

В качестве основного метода исследований использовалось дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ). Для оценки масштабов развития наледей были взяты общедоступные разновременные мультиспектральные космические снимки Sentinel-2 с атмосферной корректировкой. Для выяснения количества и площадей наледей на ФАД «Лена» был использован нормализованный разностный снеговой индекс (Normalised Difference Snow Index – далее NDSI). Изучение наледей на ФАД «Лена» осуществлялось в конце апреля и в начале мая 2018 г., когда снежный покров растаял и не создавал помех при определении границ наледей. Космические снимки Sentinel-2 выбирались с покрытием облаков менее 20 %. Систематизация, классификация и многофакторный анализ космических снимков были проведены в общедоступных программах QGIS 3.4 Madeira и MS Excel. После получения данных о количестве и границах наледей производился расчет их площадей с помощью функции «калькулятор полей» в таблице атрибутов векторного слоя, а также определялась длина наледей вдоль ФАД «Лена» с помощью функции «измерить линию». Пример алгоритма расчета площадей наледей показан на рисунке. Определение размеров и масштабов распространения наледей в естественных условиях с помощью данных ДЗЗ подробно приведено в работах [5, 6].



Краткая визуализация алгоритма вычисления площади наледи. A — слой индекса NDSI; B — слой после фильтрации пороговым значением DN> -0.01; B — итоговый векторный слой с границей наледи. Линией на изображениях обозначена автодорога «Лена»

На ФАД «Лена» от Иенгры до Чульмана зимой 1927–1928 гг. В.Г. Петровым было зафиксировано 11 наледей, суммарная площадь которых составила 81083 м², а общая их протяженность вдоль дороги — 1202 м [2]. Зимой 1959–1960 гг. В.Р. Алексеевым было отмечено 9 наледей с суммарной площадью 250580 м² и общей протяженностью вдоль дороги 2147 м [3]. В мае 2018 г. нами было описано 12 наледей с суммарной площадью 1187781 м² и суммарной протяженностью вдоль дороги 2213 м.

Таким образом, за прошедшие 90 лет эксплуатации ФАД «Лена» на отрезке Иенгра — Чульман количество и протяженность наледей изменились незначительно, но суммарная их площадь увеличилась в 14.6 раза. Существенное повышение суммарной площади наледей на исследуемом участке связана с трансформацией мерзлотно-гидрогеологических условий. Так, за 32 года (с 1927–1928 гг. по 1959–1960 гг.) суммарная площадь наледей увеличилась в 3.1 раза, а за период с 1959–1960 гг. по май 2018 г. – в 4.7 раза (за каждые 10 лет суммарная площадь наледей увеличивалась в среднем на 90 %). Повышение суммарной протяженности наледей вдоль ФАД «Лена» в 1.8 раза показывает существенное возрастание наледной опасности на притрассовой полосе в процессе эксплуатации автодороги.

- 1. Волкова Е.В., Сидорова Д.С. Реконструкция автомобильных дорог в сложных природных условиях Сибири и Дальнего Востока // ВЕСТНИК ИрГТУ. 2013. Т. 78, № 7. С. 81–84.
- 2. Петров В.Г. Наледи на Амурско-Якутской магистрали, с альбомом планов наледей. Л.: Изд. АН СССР и НИАДИ НКИС СССР, 1930. 177 с.
- 3. Алексеев В.Р., Усов В.А. Наледи Амуро-Якутской магистрали в зиму 1959–1960 гг. и состояние борьбы с ними. Чульман: Изд. ИМЗ СО АН СССР АНИМС, 1961. 93 с.
  - 4. https://rosavtodor.gov.ru.

5. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным // Лёд и снег. 2019. Т. 59, № 2. С. 201–212. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388.

Gagarin L., Wu Q., Melnikov A., Volgusheva N., Tananaev N., Jin H., Zhang Z., Zhizhin V., Morphometric analysis of groundwater icings: Intercomparison of estimation techniques // Remote Sensing. 2020. V. 12, № 4. P. 692–710. https://doi.org/10.3390/rs12040692.

# ИЗМЕНЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ТЕХНОГЕНЕЗА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-267-271

Верхотуров А.Г.<sup>1</sup>, Васютич Л.А.<sup>1</sup>, Белякова Е.Е.<sup>2</sup>, Карпов В.В.<sup>2</sup>
<sup>1</sup>Забайкальский государственный университет, Чита, weral0606@yandex.ru
<sup>2</sup>Забайкальский территориальный центр государственного мониторинга состояния недр,
Чита, gmgschita@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрены проблемы изменения экологического состояния подземных вод Забайкальского края в результате урбанизации и техногенеза. Являясь основой водоснабжения населенных пунктов, подземные воды в скважинах всё чаще загрязняются ионами металлов, взвешенными веществами и другими компонентами. Исследование направлено на установление факторов, вызывающих ухудшение экологического состояния подземных вод региона. Установлено, что экологическое состояние подземных вод в крае определяется их фоновым химическим составом и воздействиями, которые оказывают на подземную гидросферу урбанизация и техногенез. Интенсивная эксплуатация месторождений подземных вод также приводит к изменению их экологического состояния.

Ключевые слова: подземные воды, минерализация, компоненты, экология, загрязнение.

Abstract. The article deals with the problems of changing the ecological state of underground waters of the Trans-Baikal Territory as a result of urbanization and technogenesis. As the basis of the water supply of settlements, underground water in wells is increasingly polluted with metal ions, suspended solids and other components. The study is aimed at identifying the factors that cause the deterioration of the ecological state of underground waters in the region. It is established that the ecological state of underground waters in the region is determined by their background chemical composition and the effects that urbanization and technogenesis have on the underground hydrosphere. Intensive exploitation of underground water deposits also leads to changes in their ecological state.

Key words: ground water, groundwater, mineralization, components, ecology, pollution.

Задача охраны подземных вод от истощения и загрязнения является одной из наиболее актуальных для Забайкальского края в связи тем, что они являются основой водоснабжения населенных пунктов. В последние годы всё чаще в скважинах, используемых для водоснабжения, фиксируются загрязняющие вещества. Проблемы загрязнения подземных вод связаны с превышением предельно допустимых концентраций (ПДК) железа, взвешенных веществ, хлорида-иона, аммония, нефтепродуктов, фтора, солей мышьяка и других компонентов. Цель наших исследований — оценка экологического состояния подземных вод региона и выявление факторов, определяющих закономерности формирования состава пресных вод. Объектом исследований были подземные воды приповерхностной части геосреды, предметом — условия формирования и изменения их состава, в том числе и при техногенном воздействии.

В соответствии с целью методика работ включала сбор, анализ и обработку имеющихся материалов гидрогеологических исследований в Забайкальском крае, оценку геологических и гидрометеорологических условий, мониторинг подземных вод, рекогносцировочное обследование территории и отбор проб на гидрохимические анализы.

О фоновом экологическом состоянии подземных вод территории Забайкальского края можно судить по данным предшествующих исследований [1—4 и др.], в которых отмечено, что оно во многом определяется тем, в каких гидрогеологических структурах (Сибирский артезианский бассейн, Алдано-Становой гидрогеологический массив, Байкало-Витимская или Монголо-Охотская сложные гидрогеологические складчатые области) формируются подземные воды. В геоморфологическом отношении, за исключением Сибирского АБ, это горные сооружения и разделяющие их межгорные впадины, выполненные мезозойскими и кайнозойскими образованиями [3]. На высокогорных участках состав грунтовых вод гидрокарбонатный магниевый с минерализацией 0.01 г/дм<sup>3</sup>, близкий к составу снеговых и дождевых вод. На участках тектонических нарушений, обогащенных сульфидами, и в местах развития рыхлых образований минерализация грунтовых вод возрастает до 0.07 г/дм<sup>3</sup> [4]. В среднегорье их состав гидрокарбонатный кальциевый и гидрокарбонатный натриевомагниевый с кремнеземом и содержанием органических веществ. Здесь процессы

выщелачивания, растворения и почвообразования резко увеличивают миграцию химических элементов, что сказывается и на составе грунтовых вод, минерализация которых возрастает до 0.05– $0.20~\rm г/дм^3$ . В низкогорье грунтовые воды имеют гидрокарбонатный кальциевый и натриевый состав и минерализацию  $0.1~\rm r/дm^3$ . Окислительные процессы в низкогорье распространяются на глубину от нескольких десятков до сотен метров, где происходит разрушение коренных пород, окисление сульфидов, что приводит к накоплению сульфатов в подземных водах. Общая минерализация грунтовых вод увеличивается до 0.3– $0.5~\rm r/дm^3$ , а их состав становится сульфатно-гидрокарбонатным.

На юге и юго-востоке Забайкальского края в многочисленных озерных котловинах изза господствующего здесь сухого климата формируются высокоминерализованные гидрокарбонатно-хлоридные натриевые подземные воды. К северу от долин р. Шилка преобладают гидрокарбонатные натриево-кальциевые и гидрокарбонатные кальциевые воды с минерализацией не выше 0.2–0.5 г/дм<sup>3</sup>, к югу их состав изменяется до сульфатногидрокарбонатного и минерализация возрастает до 1 г/дм<sup>3</sup> [4].

Наличие многочисленных разрывных нарушений на территории края существенно нарушает климатическую зональность и высотную поясность распространения подземных вод в Забайкалье. В первую очередь это сказывается на химическом составе и минерализации подземных вод. Их состав в межгорных впадинах существенно зависит от водовмещающих отложений и от условий дренирования. Во впадинах байкальского типа Верхнечарской, Муйско-Куандинской и др. грунтовые воды, как правило, сосредоточены в подрусловых таликах и характеризуются весьма низкой минерализацией.

Во впадинах забайкальского типа грунтовые воды аллювиальных и озерноаллювиальных отложений имеют минерализацию от сотых долей до 0.2–0.5 г/дм<sup>3</sup>. В составе анионов преобладает гидрокарбонат-ион, а в составе катионов – кальций. Артезианские воды межгорных впадин пресные в зоне активного водообмена. В краевых частях бассейнов минерализация подземных вод составляет 0.25–0.30 г/дм<sup>3</sup>, а в направлении к центру она достигает 0.5 г/дм<sup>3</sup> при гидрокарбонатно-сульфатном кальциево-натриевом составе. Вертикальная гидрохимическая зональность проявляется в Балейском грабене, где минерализация подземных вод изменяется от 1.4 г/дм<sup>3</sup> на глубине 120 м до 16.1 г/дм<sup>3</sup> на глубине 250 м.

В бессточных котловинах Забайкальского края, например в районе Торейских озер, формирование артезианских вод происходит в условиях застойного режима при весьма засушливом климате [3], поэтому зона пресных вод здесь расположена только в краевых частях бассейна. По направлению к центру воды становятся солоноватыми гидрокарбонатно-хлоридными натриевыми с минерализацией 2-3 г/дм<sup>3</sup>.

Минерализация подземных вод в зонах тектонических нарушений часто бывает в несколько раз выше их фоновой минерализации в районе. Например, в низкогорье она может быть выше в два раза, достигая 1 г/дм³ при фоновом значении 0.5 г/дм³. В анионном составе появляется сульфат-ион, а иногда и хлор-ион. В составе подземных вод зон тектонических нарушений Забайкальского края часто обнаруживаются повышенные содержания железа, меди, цинка, свинца, молибдена, хрома, никеля и других элементов, а также существенное понижение рН.

Наличие в Забайкальском крае многолетнемерзлых пород (ММП) мощностью от первых метров до 500 м и более в значительной степени обеспечивает защищенность подземных вод от загрязнения с поверхности. Увеличение мощности ММП наблюдается как с юга на север, так и с запада на восток [2, 5, 6]. Существование в пределах гидрогеологических структур надмерзлотных, подмерзлотных и межмерзлотных подземных вод определяется комплексом природных факторов и антропогенными изменениями. Среди природных факторов главными при оценке защищенности пресных подземных вод, помимо наличия ММП, выступают мощность и фильтрационные свойства глинистых пород, залегающих как в зоне аэрации, так и в разделяющих водоносные горизонты слоях. В

таблице представлена защищенность подземных вод, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, в Читино-Ингодинском межгорном артезианском бассейне.

На территории края природные некондиционные подземные воды встречаются довольно часто, что связано с геохимическими особенностями водовмещающих пород, которые накладывают отпечаток на их микрокомпонентный состав, обогащая рядом элементов (уран и его дочерние продукты распада, фтор, железо, марганец и др.). Как показали результаты исследований, в Забайкальском крае имеет место современное загрязнение подземных вод, связанное с хозяйственной деятельностью человека. Последние подобные случаи можно рассмотреть на нескольких примерах.

- 1. Первые жалобы на ухудшение самочувствия из-за отравления мышьяком в водопроводной воде начались в поселке Приисковом Нерчинского района Забайкальского края в 2017 г. Тогда 30 обратившимся пациентам поставили диагноз «пойкилодермия», при котором наблюдается атрофия и пигментация кожи. После того как в июле 2018 г. специалисты краевого Роспотребнадзора выявили повышенное содержание мышьяка в водопроводной воде, медики проверили пациентов на отравление этим веществом и получили положительные результаты. Роспотребнадзор объяснил наличие солей мышьяка в водопроводе естественным изменением состава воды. Природное загрязнение связано с близостью крупных месторождений золота, спутниками которого всегда являются мышьяк и сурьма.
- 2. В селе Чикичей Сретенского района ввели режим ЧС из-за найденного 18 декабря 2019 г. мышьяка в воде из скважины.
- 3. В 2016 г. в районе фабрики «Гарсонуйского рудника» в поселке Кличка Приаргунского района из-за загрязнения мышьяком, содержание которого в почвах, прилегающих к хвостохранилищу, превышало ПДК в тысячу раз, погибло девять коров, которые паслись вблизи объекта.

Такие сообщения в Забайкальском крае появляются ежегодно, поэтому важнейшей задачей мониторинга подземных вод является оценка изменения их состояния. Эти изменения происходят в двух основных направлениях: 1) изменение структуры потока, условий и величины питания и разгрузки подземных вод вследствие понижения их уровня; 2) изменение качества подземных вод [7].

Изменения качества подземных вод вызывают следующие основные причины:

- 1) поступление к водозаборным сооружениям загрязняющих веществ из источников антропогенного загрязнения, не связанных с эксплуатацией водозабора;
- 2) подток некондиционных вод из смежных водоносных горизонтов или поверхностных водотоков и водоемов;
- 3) подтягивание некондиционных вод снизу при большой мощности горизонта и увеличение минерализации подземных вод с глубиной;
- 5) образование в подземных водах новых или увеличение содержания имеющихся нормируемых компонентов вследствие процессов физико-химического взаимодействия в системе «вода порода»;
- 6) проникновение загрязняющих веществ через устья скважин или при нарушении целостности обсадных труб.

Кроме водоотбора в пределах месторождений подземных вод, на их состояние могут оказывать влияние различные виды хозяйственной деятельности (наличие других действующих водозаборов подземных вод, которые взаимодействовать с ΜΟΓΥΤ рассматриваемым месторождением; разработка месторождений твердых ископаемых, сопровождаемая извлечением подземных вод и устройством различного рода хвостохранилищ гидроотвалов; промышленные дренажи И гидротехническое И строительство, изменяющее условия взаимосвязи поверхностных и подземных вод; строительство и эксплуатация промышленных и гражданских сооружений, коммунально-бытовых коллекторов, водонесущих коммуникаций; других сельскохозяйственное освоение территории) [7].

Характеристика защищенности основных объектов мониторинга подземных вод Забайкальского края

жарактеристика защищенное								Компонен-	
Индекс геологической структуры / индекс ВГ (ВК) и их наименование	Целевое назначение ПВ	Мощ- ность ВГ (ВК), м	Абс. отм. уровня ПВ, м	Напор уровня ПВ над кровлей, м	Защищен- ность ВГ (ВК)	Минерализа- ция, г/дм <sup>3</sup>	Тип химического состава подземных вод	ты природного происхож- дения, превышаю- щие ПДК	Примечание
С IX-Д9 (Читино-Ингодинский МАБ)  Q <sub>IV</sub> (голоценовый ВГ)	ХПВ	от 1 до 8-10	560–980	0	незащ.	0.04-0.30	Гидрокарбонат- ный кальциевый	Fe, Mn, окисляе- мость цветность,	Используется в сельской местности для децентрализованно-
С IX-Д9 (Читино-Ингодинский МАБ)  Q <sub>II-III</sub> (средневерхненеоплейстоценовый ВГ)	ХПВ	от 5 до 20	610–980	от 0 до 1–2 м.	условно защ.	0.05-0.16	Гидрокарбонат- ный кальциевый	мутность	го водоснабжения Используется в сельской местности для децентрализованного водоснабжения
С IX-Д9 (Читино-Ингодинский МАБ)  К <sub>1</sub> (нижнемеловой ВК)	ХПВ	до 200	665–920	от 0 до 150 м.	защ.	0.08-0.61	Гидрокарбонат- ный кальциево- натриевый	Fe, Mn, Li, Na	Используется для централизованного и нецентрализованного водоснабжения
С IX-Д9 (Читино-Ингодинский МАБ)  J <sub>3</sub> (верхнеюрский ВК)	ХПВ	до 200	200–700	от 0 до 150 м.	защ.	нс	нс	нс	В краевых частях МАБ используется для нецентрализованного водоснабжения
С IX-Д9 (Читино-Ингодинский МАБ)  PR-PZ (водоносная зона трещиноватости фундамента)	не использует- ся	нс	от 740 и ниже	нс	защ.	от 0.3	Гидрокарбонат- ный кальциево- натриевый	нс	ПВ кристаллического фундамента МАБ при глубоком его залегании не изучен. Имеются данные при неглубоком его залегании в краевых частях (скв.261)

Эксплуатация подземных вод, кроме изменения гидрогеологических и гидрохимических условий, может приводить к изменениям других компонентов природной среды и возникновению опасных экзогенных геологических процессов.

С аридным климатом и затрудненностью водообмена связано формирование трещинных вод с повышенной минерализацией в районе станции Даурия. Из-за отсутствия других источников здесь используются воды с минерализацией  $1.82-1.96 \, \text{г/дм}^3$ , к тому же с превышением ПДК [2] по сульфатам до  $712-759 \, \text{мг/дм}^3$  (норма  $500 \, \text{мг/дм}^3$ ), жесткости  $13.1-15.0 \, \text{мг-экв/дм}^3$  (норма 7 мг-экв/дм³). Из объектов, где зафиксированы повышенные концентрации фтора, следует отметить Бугутурский водозабор (п. Забайкальск) —  $2 \, \text{мг/дм}^3$  (норма СанПиН  $1.5 \, \text{мг/дм}^3$ ). Здесь же зафиксирована повышенная жесткость  $8 \, \text{мг-экв/дм}^3$  (норма  $7 \, \text{мг-экв/дм}^3$ ).

Подземные воды Забайкальского края, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения, по большинству показателей удовлетворяют требованиям нормативных документов. Наиболее частые отклонения связаны с концентрациями железа, марганца, фтора, а также жесткостью и минерализацией при общем количестве нормируемых показателей 27. Из 3 тыс. обследованных скважин в 10 % случаев наблюдаются отклонения по упомянутым компонентам. По железу отмечаются превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) в 3–10 раз, а в отдельных случаях – в 100 раз при норме  $0.3 \text{ мг/дм}^3$ . Для марганца концентрации составляют чаще всего 2-4 ПДК при максимальных до 10 ПДК  $0.1 \text{ мг/ дм}^3$ ). Что касается фтора, то его норма составляет  $0.7-1.5 \text{ мг/дм}^3$ . Для Забайкальского края в целом характерны концентрации ниже нижнего предела ПДК, вследствие чего необходимо рекомендовать фторирование подземных вод, используемых для питьевых целей, что в настоящее время нигде не делается. Повышенные содержания фтора до 5-6 ПДК известны в Газимуро-Заводском районе, в районах распространения флюоритовых месторождений, а также на участках проявления тектонической деятельности в виде локальных аномалий. Повышенные минерализации (более 1 г/дм<sup>3</sup>) и жесткость (более 7 мг-экв/дм<sup>3</sup>) фиксируются в горизонтах с затрудненными условиями водообмена, а также зачастую на площадях развития карбонатных пород.

Использование подземных вод с незначительными отклонениями от требований СанПиН 2.1.4.1074-01 возможно по согласованию с органами Государственного санитарного надзора, а при значительных отклонениях — после предварительной водоподготовки.

- 1. Богомолов Н.С. Закономерности распространения и формирования подземных вод в различных типах гидрогеологических структур Забайкалья (на примере Читинской области): Дис... канд. геол.-мин. наук. М.: ПНИИИС, 1972. 263 с.
  - 2. Гидрогеология Забайкальского края / Под общ. ред. В.И. Цыганка. Чита: ЗабГУ, 2017. 240 с.
  - 3. Гидрогеология СССР, Т. XXI, Читинская область. М.: Недра, 1969. 444 с.
  - 4. Степанов В.М. Гидрогеологические структуры Забайкалья. М.: Недра, 1980. 176 с.
  - 5. Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 359 с.
  - 6. Шестернев Д.М., Верхотуров А.Г. Наледи Забайкалья. Чита: ЧитГУ, 2006. 2013 с.
  - 7. Экологическая гидрогеология. М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. 397 с.

# РОДНИКИ ПРЕСНЫХ МЕЖМЕРЗЛОТНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-272-275

Гагарин Л.А., Огонёров В.В.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, gagarinla@gmail.com

Аннотация В 2020 г. проведены мерзлотно-гидрогеологические исследования родников пресных вод, расположенных в районе пос. Сюльдюкар Мирнинского района Республики Саха (Якутия). Впервые эти источники были обследованы в 1965–1967 гг. Якутской экспедицией МГУ в рамках мерзлотно-гидрогеологической и инженерно-геологической съемки алмазоносной провинции. Задачей наших исследований являлось описание родникового стока в связи с вводом в эксплуатацию каскада Вилюйских ГЭС и климатическими изменениями. В результате были измерены дебиты источников межмерзлотных подземных вод в долине рек Сюльдюкар и Вилюй, которые составили 106 и 107 л/с соответственно. Химический состав воды преимущественно сульфатно-гидрокарбонатный смешанный по катионам с минерализацией 0.33–0.44 г/л, с нейтральным значением рН = 6.9–7.2, температурой 1.6–3.1°С. Однако в долине р. Вилюй, рядом с известными с 1965 г. родниками, обнаружены новые источники. Химический состав вод последних гидрокарбонатно-сульфатный магниево-кальциевый с минерализацией 0.58–0.62 г/л, нейтральным значением рН = 6.9–7.2 и температурой воды 0.4–1.7°С.

Ключевые слова: межмерзлотные воды, многолетнемерзлые породы, изменение климата, родник.

**Abstract** Permafrost and hydrogeological studies of freshwater springs located in the area of the Syuldyukar village, Mirninsky District, Republic of Sakha have conducted in 2020. For the first time these springs were surveyed in 1965-1967 by the Yakut expedition of Moscow State University during permafrost-hydrogeological and engineering-geological surveys of a diamond province. The task of our research was to describe the spring runoff in connection with the commissioning of the Vilyui HPP cascade and climatic changes. As a result, the flow rates of intrapermafrost groundwater spring in the Suldukar River and the Vilyui River valleys were measured which amounted to 106 and 107 l/sec, respectively. The chemical composition of water is predominantly sulfate-hydrocarbonate mixed in cations with a mineralization of 0.33-0.44 g/l, with a neutral pH value = 6.9-7.2, a temperature of 1.6-3.1°C. However, in the valley of the Vilyui River, near the old springs, new springs were discovered. A chemical composition of these waters is hydrocarbonate-sulphonous magnesium-calcium with a mineralization of 0.58-0.62 g/l, a neutral pH value of 6.9-7.2 and a water temperature of 0.4-1.7°C.

Key words: intrapermafrost waters, permafrost, climate change, groundwater spring.

В бассейне р. Вилюй проживает около 166 тыс. человек, что составляет около 17 % всего населения Республики Саха (Якутия). При этом большая часть этих жителей проживает вдоль р. Вилюй. Источником водоснабжения населенных пунктов, расположенных вдоль реки, являются поверхностные воды. Так как еще с советских времен в бассейне р. Вилюй разрабатывались многочисленные месторождения полезных ископаемых, сопровождающиеся развитием сопутствующих отраслей народного хозяйства (энергетики, промышленного и гражданского строительства), всегда остро стоял вопрос об экологической безопасности региона и, особенно, загрязнении водных объектов.

В августе 2018 г. в долине р. Ирелях произошел прорыв четырех дамб дражных котлованов Мирнинского ГОК АК «Алроса» «ПАО». За считанные дни загрязненные воды достигли устья р. Малая Ботуобия, которая впадает в р. Вилюй в 1.5 км ниже по течению от Светлинского гидроузла каскада Вилюйских гидроэлектростанций. По результатам отбора и анализа проб воды в устье р. Малая Ботуобия содержание в ней взвешенных веществ превышало предельно допустимую концентрацию (ПДК) в 169 раз, ионов железа в 125 раз, и меди в 17.2 раза [1]. Ближайший населенный пункт (пос. Сюльдюкар) расположен в 200 км ниже по течению от места аварии на левом берегу р. Вилюй. Осенью 2018 г. в Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН обратилась родовая община этого поселка с просьбой о помощи в организации питьевого водоснабжения населения и проведении поисковых работ на пресную воду. В начале 2020 г. были начаты работы по проекту Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, связанному с поиском альтернативных источников водоснабжения Вилюйской группы улусов.

В ходе работ весной и осенью 2020 г. нами выполнен анализ фондовой и опубликованной литературы по теме исследования, проведены полевые рекогносцировочные и инструментальные работы на двух ключевых участках, расположенных в районе

пос. Сюльдюкар. Установлено, что мерзлотно-гидрогеологические исследования в районе этого населенного пункта проводились в 60-х годах прошлого столетия. В 1965–1967 гг. Якутской экспедицией кафедры мерзлотоведения геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова проведена комплексная мерзлотногидрогеологическая и инженерно-геологическая съемка Ботуобинского алмазоносного района ЯАССР масштаба 1:500 000 [2]. Северо-восточная часть листа этой съемки захватила участок долины р. Вилюй и ее притоков вблизи пос. Сюльдюкар. Эти исследования были выполнены до начала заполнения Вилюйского водохранилища (1967 г.), расположенного пос. Чернышевский, следовательно к тому моменту природные условия территории в районе пос. Сюльдюкар были ненарушенными. По результатам работ 1965-1967 гг. установлено местоположение источников пресных межмерзлотных подземных вод, приуроченных к карбонатным породам нижнего ордовика и расположенных в долине р. Сюльдюкар в 6 км от ее устья и на левом берегу р. Вилюй (рисунок). В течение двухгодичных циклов наблюдений установлена изменчивость химического состава родниковых вод, оценена внутригодовая вариативность дебита источников, описаны их особенности мерзлотно-гидрогеологического строения межмерзлотных генезис водоносных горизонтов [2].

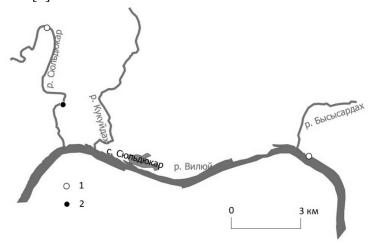


Схема местоположения источников межмерзлотных подземных вод в районе пос. Сюльдюкар. Местоположение: I — источников подземных вод; 2 — полыньи зимой 2019—2020 гг.

Введение в эксплуатацию каскада Вилюйских ГЭС в 1967 г. привело к изменению показателей стока р. Вилюй. Из-за эксплуатации гидроузлов ниже по течению суточные и недельные колебания уровня воды в р. Вилюй прослеживаются на расстоянии до 400 км от Вилюйской ГЭС и до 850 км от Светлинской ГЭС, а годовые его изменения ощутимы даже в нижнем течении р. Лены [3]. До строительства каскада водохранилищ (1959—1966 гг.) годовой сток в р. Вилюй распределялся по гидрологическим сезонам в следующем соотношении: весенний (май — июль) — 79 %, летне-осенний (август — октябрь) — 20 % и зимний (ноябрь —апрель) — 1 % [3]. После 1974 г. это распределение изменилось следующим образом: весенний — 26 %, летне-осенний — 18 % и зимний — 56 %, т.е. в абсолютных значениях весенний сток уменьшился на 1450 м³/с, летне-осенний — на 70 м³/с, а зимний увеличился на 700 м³/с [3].

Внутригодовое распределение параметров речного стока р. Вилюй с учетом климатических изменений и антропогенных воздействий за период 1974—2012 гг. приведено на примере гидропоста, расположенного в пос. Сюльдюкар, и отражено в таблице. Наблюдаемое с 1987 г. изменение гидрометеорологических параметров в некоторой степени компенсировало влияние водохранилища на перераспределение стока в направлении естественных его значений.

В притоках р. Вилюй отмечено увеличение максимального стока в основном на 25 % (наибольшее до 50 % в реках Марха и Кемпендяй) начиная с 1987 г. [3]. Вероятной причиной этих изменений является интенсивное снеготаяние весной и деградация многолетнемерзлых горных пород. Установлено, что в связи с изменением климата влияние водохранилища на значение максимального речного стока со временем ослабевает. Практически на всех гидропостах в бассейне р. Вилюй за последние десятилетия зафиксированы более ранние даты начала весеннего половодья [3].

Характеристики месячного, сезонного и годового стока воды (W), теплоты (Wт) и температуры воды (T) в среднем и нижнем течении р. Вилюй (составлено по [3])

	Весеннее половодье			Летне-осенняя межень с			Зимняя		
Характерис-	Бесе	nnee 110/10	водье	паводками			межень	За год	
тика				Месяць	 Сяцы			Затод	
	V	VI	VII	VIII	IX	Χ	X–IV		
W, км <sup>3</sup>	3.55	3.32	2.80	1.58	1.56	1.60	11.3	25.7	
W <sub>т</sub> , 10 <sup>12</sup> кДж	50	119	120	76	52	16	<1.5	435	
T, °C	3.0	9.3	12.0	12.7	8.2	2.4	<0.2	4.0	

Значения минимального летне-осеннего стока рек бассейна р. Вилюй, в связи с изменением климата, выражены не так значительно, как максимального. Тем не менее на некоторых реках его величина с 1987 г. увеличилась до 75 % [3]. Основной причиной этого, вероятно, является повышение дебита источников подземных вод в результате оттаивания многолетнемерзлых горных пород [3].

В 2020 г. авторами проведены полевые исследования на двух вышеупомянутых участках разгрузки подземных вод. Первый участок расположен в 6 км от устья р. Сюльдюкар (рисунок), а второй – в долине р. Вилюй в 7 км ниже по течению от пос. Сюльдюкар. На первом ключевом участке в марте 2020 г. при аэрообследовании в 2 км от устья р. Сюльдюкар обнаружена полынья. Наледи ниже по течению реки не наблюдалось. При повторном обследовании этого места в сентябре 2020 г. были выполнены замеры расхода воды в реке в двух створах, выше и ниже полыньи. Также были отобраны пробы воды на химический анализ, измерены показатели рН, окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и температуры воды по профилю между створами, выполнено ландшафтное описание территории. Ниже по течению р. Сюльдюкар, в 500 м от ее устья, обнаружены ландшафтные признаки присутствия наледи. Ее протяженность здесь составляет 200-300 м при максимальной мощности до 5 м. Подобный комплекс полевых работ выполнен в долине этой же реки, но на расстоянии 6 км от ее устья, где ранее (1965–1967 гг.) были обнаружены родники, дренирующие межмерзлотные водоносные горизонты. Следует отметить, что разгрузка подземных вод осуществляется вдоль левого коренного крутого склона долины р. Сюльдюкар полосой шириной около 600 м. На всем протяжении было насчитано 157 головок источников. Их суммарный дебит составил 106 л/с. Химический состав воды родников преимущественно сульфатно-гидрокарбонатный магниево-кальциевый с минерализацией 0.436 г/л, температурой  $1.6 \, ^{\circ}\text{C}$  и Eh =  $213 \, \text{mV}$ .

На втором ключевом участке в сентябре 2020 г. был обнаружен 21 родник. Все они приурочены к подножию приводораздельного склона и пойме р. Вилюй. Ширина зоны разгрузки подземных вод составила около 400 м. На этом участке были отобраны пробы воды на химический анализ, измерены показатели рН, Еh и ее температура. Дебиты всех родников инструментально измерить не удалось. Большинство из них имеет невысокий дебит, визуально — не более 5–7 л/с. Ландшафтное описание этого участка позволило установить различия в длительности существования зоны разгрузки подземных вод. Так, выше по течению р. Вилюй (источники № 1–6) ручьи, питаемые родниками, имеют ширину и глубину вреза до 0.7 и 0.5 м соответственно, а над ними имеются следы свежих провальных форм рельефа. Нижерасположенные ручьи, питаемые родниками № 7–21,

врезаны в пойму р. Вилюй на глубину до 1.0 м при ширине до 1.5 м. Ориентировочный дебит всех источников оценен нами в 107 л/с. Химический состав воды «новых» источников гидрокарбонатно-сульфатный магниево-кальциевый с минерализацией 0.58-0.62 г/л при нейтральном значении рH = 6.9-7.2, вариации значений Eh от -169 до -41 mV и температуре воды от 0.4 до 1.7 °C. Ранее обнаруженные источники по составу относятся к сульфатногидрокарбонатному магниево-кальциевому классу с минерализацией 0.33-0.44 г/л. Температура воды составляла 1.5-3.1°C при нейтральном значении рH = 6.9-7.2 и вариации величин Eh от +130 до +180 mV.

Анализ опубликованной и фондовой литературы позволил сделать следующие выводы. С 60-х годов прошлого столетия дебиты родников первой группы (долина р. Сюльдюкар) и их химический состав имеют относительную стабильность. Содержание микрокомпонентов в воде источников не превышает ПДК. Лишь в источнике № 2 зафиксировано незначительное превышение ПДК по Ва = 0.116 мг/л при допустимом ее значении <0.1 мг/л. В целом эти воды можно использовать для питьевых целей без водоподготовки. Изменение климатических параметров, а также эксплуатация каскада Вилюйских ГЭС на данном этапе исследования не позволяют выявить каких-либо существенных изменений в мерзлотно-гидрогеологической обстановке области развития межмерзлотных водоносных таликов. Однако в русловой части долины р. Сюльдюкар отмечается некоторое преобразование ее мерзлотно-гидрогеологического строения, в результате чего снизилась интенсивность наледеобразования.

Дебит родников на втором участке (в долине р. Вилюй, в 7 км ниже по течению от пос. Сюльдюкар) с 1965 г. увеличился более чем в два раза. Зона разгрузки подземных вод здесь расширилась с аналогичным значением. Причем новые источники появились в направлении вверх по течению р. Вилюй. Несмотря на удовлетворительные показатели химического состава по макрокомпонентам, вода «новых» источников имеет превышение ПДК по железу (в пробах источников № 1 и 3 содержание Fe составляет 0.53 и 0.69 соответственно при ПДК <0.3 мг/л) и стронцию (в пробах источников № 1 и 3 содержание Sr -11.6 и 12.6 мг/л соответственно при ПДК <7 мг/л). Основными признаками, отличающими ранее известные родники от «новых», являются морфология микрорельефа в зоне разгрузки подземных вод, температура воды, ее химический состав, показатель Еh. Подобные изменения режима подземных вод, вероятно, связаны с многолетним протаиванием многолетнемерзлых горных пород. Однако на данном этапе исследований сложно судить о масштабах трансформации мерзлотно-гидрогеологических условий этого участка. Причиной их, возможно, стало совместное влияние изменения климата в регионе и перераспределения внутригодового стока р. Вилюй из-за строительства каскада Вилюйских ГЭС. Вклад последнего должен быть особенно ощутимым в зимние месяцы, так как зимний сток р. Вилюй на этом участке увеличился более чем в два раза. Для подтверждения данного предположения необходимо проведение дополнительных специальных геокриологических исследований.

Работа выполнена при поддержке НО «Целевой фонд будущих поколений Республики Саха (Якутия)» (договор №108/ЦФ) и РФФИ (проект № 20-35-70027\_Стабильность).

- 1. Caйт: https://yakutia.info/article/185472. Дата обращения: 28.01.2021.
- 2. Романовский Н.Н., Волкова В.П., Бударин Ю.М. Пресные воды пород нижнего ордовика и их источники в среднем течении р. Вилюя // Мерзлотные исследования, вып. 8. М.: Изд-во МГУ, 1968. С. 129–143.
- 3. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты на нижней Лене и Вилюе // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 6. М.: Изд-во МГУ, 2015. С. 85–95.

# ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОТЛИЧИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИ РАЗНЫХ ТЕРРЕЙНОВ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-276-280

Глотов В.Е.

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, Магадан, geoecol@neisri.ru

Аннотация. В статье представлены и проанализированы данные о гидрогеологических различиях геодинамически разных террейнов. Показано, что в надмерзлотных условиях наиболее водообильны продукты выветривания пород, слагающих террейны — фрагменты пассивной континентальной окраины. В подмерзлотной обстановке более водопроницаемыми и водоемкими являются породы, слагающие террейны активной окраины. Эти отличия связаны с уровнем тектонического разрыхления пород и соответственно с различной интенсивностью процессов выветривания пород террейнов разной геодинамической природы.

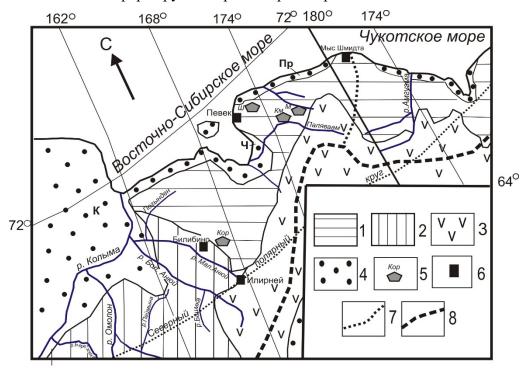
**Ключевые слова:** Заполярная Чукотка, тектоническое разрыхление, гипергенез, террейн, криолитозона, зона свободного и затрудненого водообмена.

Annotation. The article presents and analyzes data on the hydrogeological differences of geodynamically different terranes. It is shown that, under suprapermafrost conditions, the most water-rich weathering products of rocks composing terranes are fragments of the passive continental margin. In the subpermafrost environment, the more permeable and water-intensive rocks that compose the terranes of the active margin. These differences are associated with the level of tectonic loosening of rocks and, accordingly, different intensities of weathering processes in terrane rocks of different geodynamic nature.

**Key words:** Polar Chukotka, tectonic loosening, hypergenesis, terranes, permafrost, zones of free and hindered water exchange.

На предшествующих с 2012 г. до настоящего времени совещаниях, посвященных подземным водам Сибири и Дальнего Востока, нами были представлены доклады, в которых показано, что роль зоны свободного (активного, интенсивного) водообмена (ЗСВ) в формировании общего водного стока в горных районах криолитозоны в определенной степени связана с геодинамической природой террейнов, дренируемых речными системами. Это дало основание указать на них как на новый объект гидрогеологических исследований [1]. Напомним, что террейн – это ограниченное разломами геологическое тело (блок) регионального масштаба, характеризующееся составом пород, структурными особенностями, тектонической историей, отличающей его от соседних блоков. По своей геодинамической природе террейны могут быть фрагментами древних платформ (кратонами), пассивных континентальных окраин и образующихся в зонах погружения океанической коры под континентальную (зоны субдукции) активных континентальных окраин: террейны островных дуг, аккреционные, задуговые и т.д. Нами выявлены гидрологические и гидрогеологические признаки влияния террейнов на формирование практически всех составляющих водного режима рек, в том числе ледового и половодий [2, 3]. Во всех этих работах подчеркнуто, что наши заключения относятся к 3СВ, в состав которой в криолитозоне входят сезонно-талый слой (СТС), надмерзлотные и сквозные талики, а при прерывистой криолитозоне – и подмерзлотные воды. Отличительная черта этой зоны – преобразование горных пород любого генезиса в зоне выветривания или гипергенеза. Активность геохимических процессов в этой зоне определяется не только составом пород, но и степенью тектонической дезинтеграции или тектонического разрыхления [4]. Наиболее дезинтегрированы породы, слагающие террейны активных континентальных окраин, испытавших длительные во времени и в пространстве перемещения. На площадях этих террейнов продукты выветривания, прежде всего на выположенных водоразделах и на склонах речных долин, более насыщены тонкими и глинистыми частицами, чем на площадях террейнов пассивных континентальных окраин или кратонов. По этой причине современные водообменные процессы в горных долинах на террейнах активной окраины замедлены по сравнению с террейнами пассивных, соответственно СТС на них имеет меньшую толщину, меньше и стокорегулирующие свойства. Но в начале теплого периода года талые воды стекают по склонам при мерзлом основании, что отражается в более бурном начале половодий.

Вместе с тем действие фактора выветривания в подмерзлотных слоях затруднено или не происходит при мощности криолотозоны более 100–120 м. Гидрогеологическая значимость затрудненности гипергенеза в подмерзлотной зоне изучена нами на примере площади развития терригенных толщ мезозойского возраста в Заполярной Чукотке. Изучаемая территория (рисунок) омывается Восточно-Сибирским и Чукотским морями, с юга ограничена Полярным кругом (66°33'44" с.ш.), с запада – долиной р. Колыма, а с востока – меридианом 180°, за которым начинается Западное полушарие Земли. Преобладающий рельеф преимущественно горный. Только в долинах рек и на морском побережье распространены низменности, крупнейшая из которых Чаунская. В горных районах преобладают сглаженные низкие горы Чукотского нагорья. На участках интрузивных и вулканогенных массивов формируются среднегорные хребты с отметками до 1800 м.



Географо-геологическая схема Заполярной Чукотки. I-4 — горные территории на тектонической основе: I — Чукотского террейна пассивной континентальной окраины, 2 — Анюйско-Олойской системы террейнов активной окраины, 3 — эффузивных покровов мелового возраста, 4 — низменности: K — Колымская, Y — Чаунская, Y — Приморская; Y — Участки многолетних геологоразведочных работ на площадях месторождений: Y — Штокверковое, Y — Майское, Y — Комсомольское, Y — Коральвеемское; Y — Постоянные населенные пункты; Y — Северный полярный круг; Y — Северный водораздел Земли.

Реки территории горные, их водосборные площади не больше 57 тыс.  $\kappa m^2$  (р. Большой Анюй). Речные долины несут следы ледникового воздействия, в верховьях рек и в их боковых притоках имеются места развития ледниковых цирков и карр.

В горных районах повсеместно распространены арктические пустыни и арктические тундры, которые часто опускаются до уровня речных долин. В долинах развита тундра с пятнами лишайников, вдоль русла и в поймах произрастают кустарниковые ивняк и ольховник. Только в бассейнах рек Малый и Большой Анюй ниже отметки 400 м сложился ландшафт редколесной лиственницы и кедрово-стланиковых тундр [5].

Климат района определяется его расположением за Полярным кругом и близостью Северного Ледовитого океана, большая часть площади которого круглогодично покрыта льдом. Современная среднегодовая температура воздуха от -11.6 °C (верховья р. Малый Анюй) до -9.5 °C (г. Певек на побережье Восточно-Сибирского моря). Количество осадков

от 221 мм (г. Певек) до 266 мм (пос. Илирней). Отчетливо проявлены признаки современного потепления. За последние 60 лет температура воздуха возросла на 1.0–1.5 °C, а количество осадков увеличилось на 50–60 мм [6].

Геокриологическая обстановка определяется повсеместным распространением многолетнемерзлых пород (ММП) [7]. В геологическом отношении Заполярная Чукотка относится к Олойско-Чукотскому орогенному поясу, в строении которого принимает участие Чукотский террейн – фрагмент пассивной континентальной окраины и Олойско-Анюйская система террейнов активной окраины [8]. Последние сложились на территории бывшего Североазиатскую океанического пролива, разделяющего Североамериканскую литосферные плиты, которые существовали в течение периода от среднего палеозоя до раннего мела. Закрытие океана в начале позднего мела сопровождалось сближением указанных плит, поэтому сложившиеся террейны активной окраины – фрагменты островных дуг – были надвинуты на окраины этих плит. Эти события, завершившиеся около 120 млн лет назад, находят отражение в современных особенностях формирования и распространения подземных вод. Наиболее заметны гидрогеологические отличия при изучении минимального стока в теплый период года – в августе – сентябре в условиях меженного стока. В это время в питании рек участвуют преимущественно воды СТС и надмерзлотных таликов, ресурсы которых пополняются в основном за счет конденсации атмосферных водяных паров. С потеплением климата возрастает роль таяния гидрокриогенного ресурса [9]. Современная значимость этого ресурса в питании заполярных рек отражена в публикации [10]. В таблице 1 показано, что модуль минимального стока в летнюю или летне-осеннюю межень на площади развития террейнов пассивной континентальной окраины значительно превышает этот показатель на террейнах активной окраины (табл. 1).

Таблица 1. Показатели стока вод СТС в реки Заполярной Чукотки (с использованием данных работы [10])

paoorisi [10])									
No	Река, пункт;		Период	Мин. сток за 30 сут в					
п/п	площадь	Дренируемый террейн	наблюдений,	летний период, межень					
11/11	водосбора, км <sup>2</sup>		годы	MM	$\pi/c \cdot \kappa M^2$				
	Паляваам, 0.8 км	Чаунский субтеррейн	1971-1980	23	0.73				
1	ниже устья р. Кооквын; 6810	Чукотского террейна пассивной окраины	1981–1996	28	0.84				
	Погынден, устье	Зона взаимодействия Олойско-	1960-1980	8	0.25				
2	р. Инкулинвеем;	Анюйской системы террейнов активной окраины (ОАС) с Чукотским террейном	1981–1996	11	0.35				
	Инкулинвеем,	Нутесынский террейн –	1960-1980	1	0.03				
3	устье; 242	фрагмент островной вулканической дуги ОАС	1981–2010	2	0.06				
	Пеймына, 1.5 км	Олойский террейн – фрагмент	1968-1980	6	0.19				
4	выше устья; 1480	островной дуги ОАС	1981-1994	8	0.25				
	Малый Анюй,	Террейны Южно-Анюйский,	1960–1980	14	0.44				
5	пос. Островное; 30000	Ольчанский – фрагменты островных дуг ОАС	1981–2006	14	0.44				
	Баимка, пос.	Олойский и Яракваамский –	1963-1980	12	0.38				
6	Баимка; 480	фрагменты островных дуг ОАС	1981-2000	12	0.38				

Подмерзлотные воды не имеют четко выраженных выходов на дневную поверхность. Эти воды изучались с помощью скважин глубиной 200–300, реже до 500 м, при разведке рудных месторождений для изучения условий водоснабжения арктических поселков и, в редких случаях, при выполнении гидрогеологической съемки масштаба 1:200 000. Обобщенные результаты многолетних работ приведены в таблице 2.

Таблица 2. Геокриологические и гидрогеологические условия терррейнов Центрального Заполярья (по материалам полевых работ А.Ф. Гаращенко, В.П. Матвеева, Д.В. Ефимовой, Л.Н. Санниковой, О.И. Макарцева, Ю.А. Маркина, А.И. Рудавского, Г.Ю. Фейгина и др.)

Статистическая отметка Вскрытая мощность Сведения об удельных дебитах уровня подмерзлотных вод, м;  $MM\Pi$ , м; числ. – от и скважин,  $\pi/c \cdot M$ ; от min до max, числ. – от и до, знам. – аномальные значения до, знам. – средняя аномальные значения Чукотский террейн – фрагмент пассивной континентальной окраины Складчато-надвиговые блоки Район оловорудного месторождения Штокверкового (Первоначального), 27 скважин От 0.0002 до 0.01; аномальные: 0.115 в долине р. Пыркакайваам; 0.11-0.25 в <u>127–218</u> <u>181–257</u> 147 215 долине руч. Олений; 0.16 на водоразделе ручьев Олений и Рогатый Район оловорудного месторождения Комсомольского, 18 скважин 145-238 211–279 От 0.0002 до 0.07; аномальное 0.26 в 170 239 сквозном талике р. Паляваам Район золоторудного месторождения Майского, 12 скважин <u>236–264</u> 250 Аномальные +74 и 8.2 в От 0.00008 до 0.002; аномальные 2.12 в 210-260 237 подмерзлотных емкостях долине в сквозном талике р. Паляваам долин ручьев Виктория и Паковлад Поле развития пород триасового возраста вне осложняющих структур – 9 скважин 100-213 160-530 145 Максимальные – в долинах От 0.000003 до 0.001; аномальные до Наибольшая – на верховий рек при наличии 1.5 в зонах сквозных таликов горных склонах, озер ледникового наименьшая – в речных происхождения долинах Олойско-Анюйская система террейнов-фрагментов активной окраины –7 скважин До 560 м – сквозной талик в долине р. Коральвеем; От 0.01 (месторождение Встречное) до аномальные с статическими 120-263 45 (сквозной талик в долине р. отметками в единицы и 165 первые десятки м – в Коральвеем) замкнутых подмерзлотных

Примечание. Мерзлотно-гидрогеологические показатели по скважинам в прибрежноморской зоне не включены.

линзах.

Представленные в таблице 2 данные, в сочетании с уже установленными ранее закономерностями связи надмерзлотных и сквозных таликов с развитием в долинах горных рек отложений ледникового комплекса мощностью более 10 м [11], позволяют рассматривать площадь Чукотского террейна как сложную гидрогеологическую структуру, подмерзлотные воды которой находятся в условиях затрудненного и весьма затрудненного водообмена. На этом фоне выделяются ограниченные разломами тектонически напряженные складчато-надвиговые или складчато-чешуйчатые участки (своды, блоки) с подмерзлотными водами, распространенными в зонах брекчирования и горизонтальных надвигах, водопроводимость которых, судя по удельным дебитам, в десятки и сотни раз превышает этот показатель в окружающих массивах горных пород. По этой причине подмерзлотный обмен в таких сводах затруднен даже под руслами дренирующих их водотоков. В подмерзлотных водах накапливаются ионы угольной кислоты, возможно низкомолекулярные органические кислоты как продукты разложения органического

вещества черных глинистых сланцев триаса при дефиците кислорода, сохраняется хлор-ион – продукт четвертичных трансгрессий и образовавшиеся при позднеплейстоценовых промерзаниях линзы криопэгов, подобные вскрытым на Майском и Штокверковом месторождениях.

Таким образом, несмотря на малое количество накопленных данных, можно утверждать, что в регионах, сложенных фрагментами активных окраин континентальных плит, подмерзлотная зона более водопроницаема. Кроме того, выше и водопроводимость триасовых трещиноватых пород в зонах сквозных таликов. Например, в долине р. Кэпэрвеем и Коральвеем удельные дебиты скважин при откачках из триасовых пород достигали 42 л/с·м, а в долине р. Паляваам их значение менее 3.

Следовательно, есть основания считать, что зона свободного водообмена на площадях террейнов — фрагментов пассивных континентальных окраин более водообильна, чем на террейнах — фрагментах активных окраин. В подмерзлотной зоне затрудненного водообмена, не затронутой процессами гипергенного преобразования, водообильность выше в породах, слагающих террейны — фрагменты активных окраин.

Автор благодарен Л.П. Глотовой за помощь в сборе фактического материала и оформлении данного доклада. Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках проекта №18-05–60036.

- 1. Глотов В.Е. Террейны новые объекты гидрогеологических исследований // Подземные воды России: Мат-лы Всеросс. совещ. по подз. водам востока России (XXII совещ. по подз. водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием). Новосибирск-Иркутск: ГЕО СО РАН, 2018. С. 156-160.
- 2. Глотов В.Е., Глотова Л.П., Ушаков М.В. Тектонический контроль ледового режима водотоков Верхней Колымы // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017. № 3. С. 31–40.
- 3. Глотов В.Е., Глотова Л.П., Ушаков М.В. Геологическая история как фактор формирования половодья в горных районах криолитозоны (на примере Верхней Колымы) // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. № 1 (Т. 12). С. 26–38.
- 4. Леонов М.Г., Кочерян Г.Г., Ревуженко А.Ф., Лавриков С.В. Тектоника разрыхления: геологические данные и физика процесса // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11, № 3. С. 491–521. DOI:10.5800/GT-2020-11-3-0488.
- 5. Беликович А.В., Галанин А.В., Галанин А.А. и др. Природа и ресурсы Чукотки. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 1997. 236 с.
- 6. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году. М.: МинПриродыРоссии, 2018. 889 с.
- 7. Афанасенко В.Е., Замолотчикова С.А., Тишин М.И., Зуев И.А. Северо-Восточный регион // Геокриология России. М.: Недра, 1989. С. 280–292.
- 8. Бялобжеский С.Г., Горячев Н.А., Шпикерман В.М. Кратоны и орогенные пояса востока России // Геодинамика, магматизм и металлогения востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. С. 144–152.
- 9. Алексеев В.Р. Талые воды криогенный ресурс планеты // География и природные ресурсы, 2012. № 1. С. 24–31.
- 10. Глотов В.Е., Ушаков М.В. Климатически обусловленные изменения стока заполярных рек Западной Чукотки // Криосфера Земли. 2020. Т. 24, № 6. С. 33–44.
- 11. Глотов В.Е. Талики районов горно-долинного оледенения в Заполярной Чукотке // Разведка и охрана недр. 2020. № 5. С. 26—32.

# ОБ ОХЛАЖДЕНИИ ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩ ВОСХОДЯЩИМ ПОТОКОМ МЕТАНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-281-284

Голубев В.А.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, golubev@crust.irk.ru

**Аннотация**. В настоящей статье рассмотрена модель промерзания осадочных толщ Тункинской впадины, основанная на дроссельном эффекте фильтрующегося через них газообразного метана. Показано, что для успешного функционирования такой модели промерзания необходимы чрезвычайно большие объемы этого газа. Кроме того, следует учитывать, что при замерзании поровой воды гидравлическая проницаемость осадков резко снижается, что приводит к такому же снижению расхода восходящего газа и соответственно к остановке промерзания. Делается вывод, что мерзлота глубоких горизонтов Тункинской впадины с газовой разгрузкой не связана.

Ключевые слова: промерзание осадков, дроссельный эффект, метан.

**Abstract**. The model of freezing of sedimentary strata of the Tunka depression, taking into account the throttling effect of gaseous methane filtering through them, is considered. It is shown that extremely large volumes of this gas are required for the successful functioning of such a freezing model. In addition, it should be borne in mind that when pore water freezes, the hydraulic permeability of sediments sharply decreases, which leads to the same decrease in the flow rate of the rising gas and, accordingly, to stop freezing. It is concluded that the permafrost of the deep horizons of the Tunka depression is not associated with gas discharge.

Key words: freezing of sediments, throttle effect, methane.

Около семидесяти лет назад в сухопутных впадинах Байкальской рифтовой зоны были пробурены глубокие скважины, данные по которым и по сей день остаются наиболее важными в знаниях о тепловом состоянии недр этого региона. Две из таких скважин, одна глубиной 1026 м (скв. Р-1) и вторая – 2117 м (скв. 2-0), пробурены в Тункинской впадине. Скв. Р-1 находится вблизи южного борта впадины. На глубине 1000 м она вскрыла граниты фундамента. Скв. 2-0 пройдена в центральной части впадины и фундамента не достигла, поскольку, согласно прогнозным данным, он здесь находится на глубине около 3000 м. Несмотря на более чем двукратное различие глубин температура на забое этих скважин одинакова и достигает 53 °C [1, 2]. В верхней части разреза скв. 2-0 прослеживается слабое нарастание температур с глубиной. Причиной этого, согласно большинству исследований, является широкое распространение в Тункинской впадине островной и слоистой многолетней мерзлоты [3, 4]. По результатам бурения и геофизики, а также визуальных наблюдений за керновым материалом в осадочном разрезе этой впадины под толщей талых пород мощностью от 45-50 до 440-500 м выделен второй слой - так называемый байкальский тип мерзлоты, распространенный до глубины 900 –1100 м [3–5]. Возникновение и сохранение мерзлоты на указанных глубинах этой впадины до сих пор не нашло убедительного объяснения.

Среди причин, приводящих к промерзанию осадочных толщ, кроме климатического фактора, иногда указывается возможность их охлаждения и последующего промерзания под влиянием термобарических изменений, происходящих в газах при их расширении в процессе восходящей фильтрации через эти толщи [6]. Несомненно, что для существенного охлаждения осадков расширяющимися газами необходим в достаточном количестве восходящий газ и хорошо проницаемые осадочные отложения. На генерацию метана в количествах, обеспечивающих формирование его газовой фазы внутри осадочного наполнения Тункинской впадины, указывается в работе [7]. Это послужило основой идеи о том, что мерзлота здесь появилась в результате дроссельного охлаждения осадочных толщ восходящим потоком метана [7]. Такое истолкование возникновения мерзлоты весьма интересно, поскольку в этом случае источник охлаждения горных пород находится под ними – ниже границы их промерзания. В общепринятых же моделях в качестве причины промерзания рассматривается климатический фактор, обеспечивающий достаточное снижение температуры на верхней границе осадков и проникновение этого охлаждения на глубину.

#### Дроссельный эффект Джоуля-Томсона

Дроссельный эффект расширяющихся газов обнаружен опытным путем в 1852 г. Он заключается в том, что расширение газа в теплоизолированной системе приводит к его охлаждению. Степень охлаждения газа зависит от величины снижения его давления и рассчитывается по формуле Джоуля-Томсона [8]:

$$DT = k \cdot DP, \tag{1}$$

в которой DT — величина снижения температуры газа, обусловленная снижением его давления на величину DP, k — коэффициент Джоуля-Томсона, показывающий величину снижения температуры газа при уменьшении его давления на единицу, например на 1 МПа (10 бар). Величина k для различных газов различна. В некоторой мере она изменяется и в зависимости от того, в какой области температур и давлений происходит их расширение. Будем использовать в наших расчетах значение k, равное 4.8 °С/МПа. Это табличное значение коэффициента Джоуля-Томсона для метана, находящегося при температуре 0 °С и давлении 1 бар [8]. Такие температура и давление, по-видимому, близки к их величинам в условиях промерзания Тункинской впадины. Отметим, что при более высоких температурах и давлениях значение коэффициента k меньше указанного и, следовательно, эффект охлаждения и промерзания будет меньше.

При выборе величины DP будем считать, что в результате генерации газообразного метана и действия других факторов нарастание порового давления с ростом глубины в толще осадков Тункинской впадины в два раза превышает гидростатическое, т.е. градиент нарастания давления с глубиной здесь составляет 0.2 бара/м (0.02 МПа/м). Дальнейшие расчеты упростятся, если их выполнить для единичного объема осадков, например для 1 м<sup>3</sup>. Полученные при этом оценки можно распространить и на всю осадочную толщу впадины.

Итак, выполним расчет дроссельного эффекта для этого единичного объема осадков. В такой модели метан в виде его газовой фазы перемещается от нижней грани куба к его верхней грани под влиянием разности давлений на этих гранях, равной  $0.02~\mathrm{MПa}$ . Подставив такое DP и k, равное  $4.8~\mathrm{^{\circ}C/Mna}$ , в выражение (1) для величины DT получим  $0.096~\mathrm{^{\circ}C}$ . Следуя смыслу дроссельного эффекта, можем заключить, что если бы обмена теплом между осадками и фильтрующимся через них метаном не было, то температура этого газа с переходом от нижней грани куба к верхней снизилась бы на  $0.096~\mathrm{^{\circ}C}$ . В реальности же такой теплообмен существует. Ключевыми величинами этого теплообмена являются теплоемкость фильтрующегося газа и теплоемкость перехода осадков в мерзлое состояние. Величину теплоемкости единицы массы фильтрующегося при температуре  $0~\mathrm{^{\circ}C}$  газа метана ( $\mathrm{C_r}$ ) можно принять равной  $2.2~\mathrm{Дж/r^{\circ}C}$  [8]. С учетом этого рассчитаем количество тепла  $\mathrm{DQ_r}$ , теряемого одним граммом газа метана при фильтрации его от нижней к верхней грани куба:

$$DO_{\Gamma} = C_{\Gamma} \cdot DT. \tag{2}$$

Подставив в это выражение указанные выше значения DT и  $C_{\Gamma}$ , получим, что каждый грамм метана при перемещении от нижней грани куба к верхней теряет 0.211~Дж тепла ( $DQ_{\Gamma} = 0.211~Дж/\Gamma$ ).

При оценке теплоемкости фазового перехода осадков в мерзлое состояние будем считать, что в лед превращается вся поровая вода осадков. Поскольку на долю поровой воды приходится 20 % объема осадков, объем этой воды составляет 0.2  $\text{m}^3$ , а ее масса ( $\text{m}_{\text{в}}$ ) в объеме 1  $\text{m}^3$  осадков составляет 200 кг. Расчет количества тепла, необходимого для перехода этой массы поровой воды в лед ( $Q_{\text{л}}$ ), выполним, используя выражение:

$$Q_{\pi} = L \cdot m_{B}, \tag{3}$$

в котором  $L=335\cdot 10^3$  Дж/кг — общепринятое значение теплоты фазового перехода воды в лед [8]. Используя это значение для величины L, а также значение  $m_B=200$  кг, получим, что при переходе 1  $m^3$  осадочных отложений Тункинской впадины в мерзлое состояние выделяется  $67\cdot 10^6$  Дж тепла. Массу газа ( $m_{\Gamma}$ ), необходимую для промерзания 1  $m^3$  осадков Тункинской впадины восходящим потоком метана, рассчитаем, используя выражение:

$$\mathbf{m}_{\Gamma} = \mathbf{Q}_{\mathbb{I}}/\mathbf{D}\mathbf{Q}_{\Gamma}. \tag{4}$$

Подставив в него  $Q_{\pi}$ , равное  $67\cdot10^6$  Дж, и  $DQ_{\Gamma}$ , равное 0.211 Дж/г, получим, что под влиянием дроссельного эффекта 1 м<sup>3</sup> осадочных пород Тункинской впадины перейдет в мерзлое состояние при сквозном вертикальном просачивании через него  $318\cdot10^6$  г (318 т) газообразного метана.

#### Обсуждение результатов

Предельная простота рассмотренной модели промерзания позволяет получить оценку лишь минимальной величины массы газообразного метана. Это следует из того, что в модели не учтены многие явления, требующие дополнительных расходов восходящего метана. К таким неучтенным явлениям, например, относятся: 1) первоначальное охлаждение осадков, необходимое для перехода их от состояния с положительными температурами до состояния, при котором начинается их промерзание; 2) генерация тепла самим просачивающимся газом из-за трения его о минеральный каркас осадков. Не учтены в модели и другие явления той же направленности. Итак, полученная величина  $m_{\Gamma} = 318$  т газообразного метана, который при своем просачивании через 1 м³ осадков Тункинской впадины приводит к их промерзанию, представляет собой оценку по минимуму.

Оценим объем, который займет полученная нами масса метана, находясь на глубине, например, 1 км. Из весьма простых расчетов следует, что 318 т этого газа при выходе на земную поверхность (при температуре 0 °C и давлении 0.1 МПа) занимает объем 444· $10^3$  м<sup>3</sup>. Для нашей оценки будем считать метан идеальным газом и примем, как и ранее, что нарастание его давления с ростом глубины в два раза превышает гидростатическое. С учетом этого легко найти давление на глубине 1 км -20 МПа, а его объем  $-2.22\cdot10^3$  м<sup>3</sup>. Данный объем газа, согласно нашей модели, должен находиться под одним квадратным метром осадочных отложений в виде вытянутого по вертикали параллелепипеда высотой  $2.22\cdot10^3$  м (2.22 км). Полученная высота слоя газа равна величине средней мощности осадков Тункинской впадины или даже превышает ее.

Сравним полученный результат с опубликованными материалами. Согласно [9], плотность генерации углеводородных газов в баженовской свите Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна составляет  $500 \text{ m}^3/\text{m}^2$ . Это значение почти в 1000 раз меньше  $444 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{m}^2$  — объема метана, требуемого для промерзания  $1 \text{ m}^3$  пород Тункинской впадины. Однако следует отметить, что промерзание осадочных отложений за счет восходящих газов не может быть реализовано в ощутимых масштабах по той причине, что уже первоначальный слой мерзлых пород, возникающий на верхней границе осадочной толщи, может оказаться непроницаемым для последующих, поступающих снизу, порций метана и, следовательно, промерзание осадков восходящим газом прекратится уже в самом начале этого процесса.

#### Заключение

Чрезвычайно большие объемы восходящего газообразного метана, необходимые для промерзания осадочных отложений впадины, а также снижение проницаемости этих отложений уже в самом начале их промерзания указывают на нереальность существенного газового охлаждения и промерзания осадков этой впадины. Следовательно, поднятый в данной публикации вопрос о происхождении и сохранении мерзлоты в глубоких осадочных толщах Тункинской впадины остается открытым.

- 1. Лысак С.В. Геотермическое поле и термальные воды Восточной Сибири. М.: Наука, 1968. 120 с.
- 2. Ломоносов И.С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1974. 164 с.
- 3. Солоненко В.П. Очерки по инженерной геологии Восточной Сибири. Иркутск: Иркутское книжное излательство, 1960, 88 с.
- 4. Булмасов А.Р. Структура и аномалии силы тяжести криогенного происхождения в Прибайкалье // Геология и геофизика. 1963. № 2. С. 75–85.

- 5. Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н. Рифтовые впадины Прибайкалья: Тектоническое строение и история развития. Новосибирск: Академическое изд-во "Гео ", 2009. 316 с.
- 6. Бгатов В.И., Ларгин А.Ф. Происхождение многолетнемерзлых пород // Советская геология. 1990. № 8. С.102-108.
- 7. Павлов С.Х., Чудненко К.В., Голубев В.А., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Геологические факторы и физико-химические процессы формирования подземных вод Тункинской впадины // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 1. С. 221–248.
- 8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
- 9. Дешин А.А., Сафронов П.И., Бурштейн Л.М. Оценки времени реализации главной фазы нефтеобразования в средне-верхнеюрских отложениях севера Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2017. № 4. С.33-44.

# ТЕХНОГЕННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ РАССОЛОВ СРЕДНЕКЕМБРИЙСКОГО ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА ТРУБКИ УДАЧНОЙ НА ТЕМПЕРАТУРУ МАССИВА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ УЧАСТКА ЗАКАЧКИ «ЛЕВОБЕРЕЖНЫЙ»

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-285-288

Ильин А.В. $^{1}$ , Газизова Т.Ф. $^{2}$ 

 $^{1}$ Вилюйская ГРЭ АК «АЛРОСА», Мирный, ilinav@alrosa.ru  $^{2}$ Иркутский государственный университет, Иркутск, gazizova@list.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты многолетних наблюдений за температурным полем многолетнемерзлых пород, проводимых с целью определения влияния техногенных процессов на мерзлотно-геотермические условия участка закачки дренажных и шахтных вод подземного рудника «Удачный» – «Левобережный». Среднее значение температуры горных пород в интервале 10–250 м составляет –2.63 °C. Среднее фоновое значение температуры рассолов до начала эксплуатации участка в интервале 150–250 м составляет –3.7 °C.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы, подземные рассолы, техногенный талик кимберлитовая трубка Удачная.

**Abstract.** The paper presents the results of long-term observations of the temperature field of permafrost, carried out in order to determine the effect of technogenic processes on the permafrost-geothermal conditions of the site of pumping drainage and mine waters of the underground mine «Udachny» – «Levoberezhny». The average temperature of rocks in the range of 10–250 m is –2.63 °C. The average background temperature of the brines before the start of operation of the site in the range of 150–250 m is –3.7 °C.

**Key words:** perennially frozen rocks, underground brines, technogenic talik, Udachnaya kimberlite pipe.

Район работ находится в центральной части Среднесибирского плоскогорья. Территориально площадь относится к Мирнинскому району Республики Саха (Якутия). Среднегодовая температура воздуха составляет -10.6 °C [1].

Территория района входит в состав северной геокриологической зоны Сибирской платформы, которой свойственно сплошное распространение многолетнемерзлых пород (ММП), непрерывность криогенной толщи, значительная мощность (до 1500 м) и низкая среднегодовая температура горных пород (до –8.8 °С) [2]. Основной чертой климата региона, особенно его северной части, является резкая континентальность. Низкая среднегодовая температура воздуха и отрицательный годовой радиационный баланс благоприятствуют сохранению, а также локальному преобразованию теплового поля мерзлых массивов. Температурный режим мерзлой толщи имеет прямую связь с температурой земной поверхности и формируется, кроме всего, под воздействием климатических, ландшафтных, геоморфологических и других факторов. При этом температура горных пород от водоразделов к долинам постепенно понижается. Температурный режим мерзлых пород в долинах рек отличается существенной пространственной неоднородностью. Более широким спектром температур характеризуются склоны. На этих участках встречаются сильно охлажденные отложения.

Многолетнемерзлые породы представлены карбонатно-глинистыми отложениями моркокинской свиты, а также верхней пачки мархинской свиты верхнего кембрия.

Объектом исследований явился участок закачки дренажных и шахтных вод подземного рудника «Удачный» — «Левобережный». Он приурочен к зоне развития ММП, подошва которых залегает на абсолютных отметках от +100 до +150 м. Мощность слоя сезонного оттаивания колеблется в пределах 0.4–2.5 м и зависит от экспозиции склонов, литологии пород и характера растительного покрова.

Рациональное использование природных ресурсов и геологической среды северных территорий является одной из актуальнейших глобальных проблем современности. Хрупкая природная обстановка и возрастающая концентрация производства в районах криолитозоны приводят зачастую к необратимым отрицательным экологическим последствиям при отработке различных месторождений полезных ископаемых. Алмазодобывающие предприятия в Западной Якутии не являются исключением, поэтому в АК «АЛРОСА» были

разработаны определенные концепции уменьшения (в некоторых случаях и ликвидации) вредных воздействий горного производства на природную обстановку.

Распространение на всей территории Западной Якутии мощной толщи ММП, перекрывающей верхнюю, наиболее незащищенную, часть разреза (зону интенсивного водообмена), позволяет учитывать и использовать этот естественный благоприятный фактор в природоохранных направлениях.

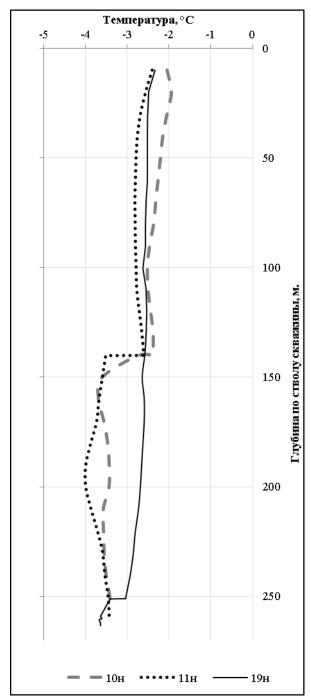


Рис. 1. Фоновая температура горных пород до начала закачки.

Криогенные геологические структуры с определенной, в основном тектонической, нарушенностью и пластово-поровой и карстовой пустотностью ММП обладают естественной и наведенной емкостью. При воздействии на льдистую составляющую пород этих структур высокоминерализованными дренажными водами происходит формирование дополнительной гравитационной емкости в техногенном талике внутри мерзлого массива. В такие естественные коллекторы производится закачка дренажных вод (крепких рассолов) хлоридного кальциевого состава.

Многолетнемерзлые породы ММП как объект для изоляции дренажных рассолов – термодинамически неустойчивая толща [3, 4]. Температура сбрасываемых вод находится в прямой зависимости от температуры окружающего воздуха, при этом разница в летние и зимние периоды года значительная. Изменение температурного режима на эксплуатируемом участке закачки зависит от ряда факторов, как природных (теплофизические, емкостные и другие свойства горных пород), так и технологических (объемы дренажных вод, интенсивность сброса и т.д.).

В настоящей работе представлены результаты многолетних наблюдений за температурным режимом ММП при формировании техногенного талика в результате отведения подземных вод в существующие и формируемые емкости коллекторов в толщах криолитозоны. Естественный геотермический фон горных пород, зафиксированный сотрудниками Института мерзлотоведения СО РАН до начала применения метода закачки в ММП, изменяется в интервале –0.93...–5.90 °C. Наиболее высокие температурные показатели отмечены на водоразделах [5].

Геотермические наблюдения проводились с целью определения влияния техногенных процессов на тепловое поле мерзлого массива. До начала эксплуатации участка закачки были получены фоновые значения температуры массива многолетнемерзлых пород в интервале 10-260 м. Температура горных пород в указанном интервале изменяется от -2.34 до -3.67 °C (рис. 1).

При проходке скважин вскрыта кровля верхнекембрийского водоносного комплекса. Пьезометрический уровень четко фиксировался в ходе режимных наблюдений измеряемой аппаратурой. Установлено, что температура рассола в интервале 150–260 м изменяется от -3.41 до -3.99 °C (рис.1).

Результаты замеров представлены по закачному ряду скважин № 13-123 в интервалах распространения техногенного талика (150–250 м) участка «Левобережный». Эти скважины эксплуатировались с 2013 по 2019 г. В настоящее время отвод дренажных рассолов осуществляется в закачной ряд скважин № 133-183.

Термометрический мониторинг проводился каротажной станцией ПКС-1. Для измерений использовался прибор СТ-32, предназначенный для измерения температуры по стволу скважины, в том числе для измерений температуры любой жидкости. Минимум за сутки до начала проведения исследований закачка в скважинах останавливалась для восстановления уровня подземных вод и стабилизации температуры. Полученные результаты, учитывая погрешность измерений, равную 0.5 °C, можно считать сходимыми (рис. 2).

Минимальная температура зафиксирована по стволу скважины № 13 и составила -7.8, что на 4.0 °C ниже среднего фонового показателя для обводненного интервала. Максимальная температура отмечена в летний период в скважине № 83 -1.66 °C, что на 5.36 °C выше среднего значения.

Стоит отметить, что по термограммам скважин, расположенных вблизи с эксплуатационными, после начала наблюдений температурный режим значительных скачков или изменений не претерпевает. Изменения температуры жидкости по скважинам, расположенным в периферии участка, схожи. Температура пород составляет –4...–2 °С. Плавный характер температурных кривых свидетельствует о том, что распространение закачиваемых рассолов в массиве ММП на участке происходит достаточно равномерно.

Режимные температурные наблюдения в районе работ позволили выявить трансформацию теплового поля в интервалах сформированного техногенного талика — за счет поступающих рассолов происходит охлаждение ММП. Как правило, колебания температуры внутри системы захоронения имеют циклично-сезонный характер.

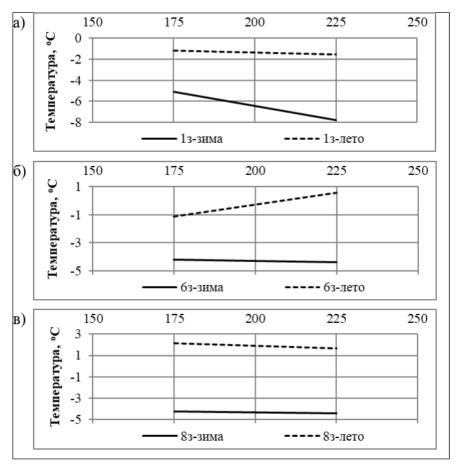


Рис. 2. Средняя температура по стволу скважин в процессе эксплуатации участка закачки в разные временные периоды (зима – лето).

Установлено, что температура внутри поглощающей криогенной толщи зависит от режима водосброса и имеет сезонно-цикличный характер. Если рассматривать этот вопрос более глобально, то изменение температуры подземных вод и вмещающих горных пород под влиянием техногенных факторов можно отнести к тепловому нарушению естественного состояния криолитозоны. Нестационарное температурное поле формируется локально и исключительно в период эксплуатации закачного ряда скважин.

- 1. Геокриология СССР. Средняя Сибирь. М.: Недра, 1989.
- 2. Балобаев В.Т., Девяткин В.Н. Мерзлотно-геотермические условия Западной Якутии в связи с ее нефтегазоносностью // Гидрогеология нефтегазоносных областей Сибирской платформы. Новосибирск, 1982.
- 3. Алексеев С.В. Криогенез подземных вод и горных пород (на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии). Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 2000.
- 4. Дроздов А.В., Шубин Г.В., Кирюшин Д.И. Изменение температурных полей в криолитозоне при отработке алмазных месторождений Западной Якутии открытым способом (на примере трубки Удачной) // Криосфера Земли. 2007. Т. XI, № 2.
- 5. Готовцев С.П., Климовский И.В. Влияние закачки дренажных вод на температуру мерзлых пород // Формирование подземных вод криолитозоны. Якутск: ИМЗ СО РАН, 1992.

#### СУБАЭРАЛЬНЫЕ НАДМЕРЗЛОТНЫЕ ВОДОНОСНЫЕ ТАЛИКИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-289-291

Лебедева Л.С., Христофоров И.И., Данилов К.П. Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, lyudmilaslebedeva@gmail.com

Аннотация. Дана приблизительная оценка распространения надмерзлотных субаэральных таликов в сплошной криолитозоне западной части Центральной Якутии с использованием методов георадиолокации и ключевых участков. Таликовость региона может составлять более 6 % только за счет субаэральных таликов. Эта оценка не включает в себя субаквальные талики и превышает ранее опубликованные в литературе сведения о таликовости региона как минимум в полтора раза. Надмерзлотные субаэральные водоносные талики могут использоваться как круглогодично действующий источник водоснабжения.

**Ключевые слова**: субаэральный надмерзлотный водоносный талик, сплошная криолитозона, Центральная Якутия, георадиолокации, мерзлотный ландшафт.

**Abstract**. An approximate estimate of the suprapermafrost subaerial taliks distribution in the continuous permafrost zone of the western part of Central Yakutia is given using GPR methods and key areas approach. The talik fraction of the region can be more than 6% only due to the subaerial taliks. This estimate does not include subaqueous taliks and is at least one and a half times higher than the previously published information on the talik fraction of the region. Suprapermafrost subaerial talik aquifers can be used as a year-round source of water supply.

**Key words**: subaerial suprapermafrost talik, continuous permafrost, Central Yakutia, GPR, permafrost landscape.

#### Введение

В Центральной Якутии распространена сплошная мерзлота с температурой от -2 до -10 °С. Сквозные талики вскрыты бурением под некоторыми крупными озерами (Хатылыма, Ломтука, Туустах, Ытык-Кюель, Былдяны, Джогудай и др.), а также под р. Леной в районе Табагинского и Кангаласского мысов [1]. Также развиты несквозные подозерные и подрусловые талики гидрогенного типа по классификации Н.Н. Романовского [2]. Коэффициент таликовости территории меняется от 0.07 до 4.70 % и связан, в первую очередь, с долей озер [1]. Единичные надмерзлотные субаэральные талики в Центральной Якутии упоминаются в литературе. Субаэральные талики, как правило, водоносны, приурочены к сухим слабозадернованным песчаным массивам, покрытым редким сосновым лесом [1, 3-5]. По мерзлотно-ландшафтной карте Республики Саха (Якутия) масштаба 1: 1 500 000 [6] чуть больше 7 % территории (более 200 тыс. км<sup>2</sup>) покрыто сосновыми лесами. Их большая часть сосредоточена в Центральной Якутии. Предшествующие геофизические исследования и буровые работы показали, что площадь распространения надмерзлотных водоносных субаэральных таликов на водосборе р. Шестаковка площадью водосбора 170 км<sup>2</sup> г. Якутска составляет 20-25 %, что превышает все предыдущие оценки таликовости для данной территории [7]. Широкое распространение сосновых лесов на песчаных отложениях в Центральной Якутии дает основание предположить, что опубликованные в литературе данные о таликовости региона занижают площадь надмерзлотных таликов.

Целью наших исследований является оценка распространения субаэральных надмерзлотных таликов в западной части Центральной Якутии с помощью георадиолокации и метода ключевых участков.

#### Методы и объект исследования

В западной части Центральной Якутии между г. Якутском и г. Вилюйском вдоль федеральной автомобильной дороги (ФАД) «Вилюй» были выбраны 37 ключевых участков в сосновых лесах. Расстояние между наиболее удаленными профилями по прямой линии около 360 км. В период с 24 по 28 сентября 2020 г., когда мощность СТС имеет значение, близкое к максимальному, нами были проведены измерения на выбранных ключевых участках с целью установления наличия или отсутствия надмерзлотных таликов в верхней части

геологического разреза до глубины 20–25 м. Измерения выполнены с применением сертифицированного георадиолокатора ОКО-3 компании «Логис-ГЕОТЕХ» (г. Москва) с центральной частотой 150 МГц. Для определения расстояния на профиле использован оптический одометр, прикрепленный к георадару. В результате рекогносцировочных работ в бассейне р. Шестаковка, где наличие надмерзлотных таликов ранее было подтверждено бурением [7], выбраны оптимальные параметры съемки: развертка по глубине – 400 нс, накопление сигналов – 16, диэлектрическая проницаемость – 6. Привязка результатов измерений к местности производилась при помощи GPS-приемника Garmin 62S. Обработка данных георадиолокации осуществлялась на программном обеспечении GeoScan-32.

#### Результаты

На 19 профилях (51 %) из 37 под сезонноталым слоем залегает многолетняя мерзлота, на девяти профилях (24 %) выявлены надмерзлотные талики мощностью от 5 до 20 м, на пяти профилях (14 %) высока вероятность наличия талых зон, на четырех профилях (11 %) прослеживаются границы, правильная интерпретация которых без дополнительных материалов затруднена (наличие таликов под вопросом). Радарограммы по профилям с наличием и отсутствием таликов показаны на рисунках 1 и 2.

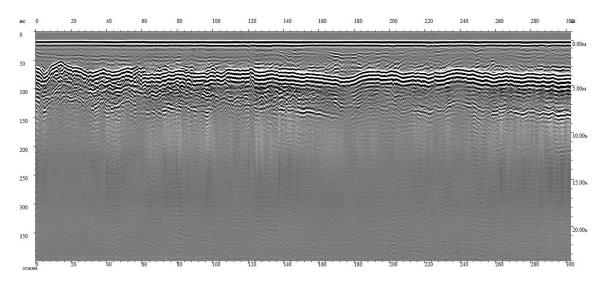


Рис. 1. Радарограмма на профиле с отсутствием таликов.

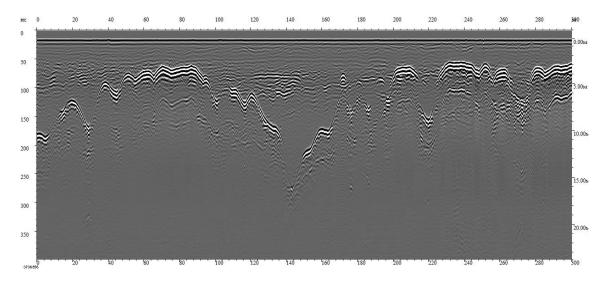


Рис. 2. Радарограмма на профиле с наличием таликов.

Выявленные талики сконцентрированы около реки Кенкеме (35–50 км от г. Якутска) и между реками Тангнары и Эйим (около 430 км от г. Якутска вдоль ФАД «Вилюй»). Анализ распространения различных типов растительности вдоль ФАД «Вилюй» по мерзлотноландшафтной карте Республики Саха (Якутия) масштаба 1: 1 500 000 (2018) показал, что 52 % протяженности трассы проходит по кустарниковым и кустарниково-зеленомошным лиственничным лесам, 26 % — по кустарничковым и кустарничково-зеленомошным сосноволиственничным лесам, 18 % — по среднетаежной долинной растительности и 4 % — по кустарничковым и кустарничковым и кустарничково-моховым сосновым лесам. Согласно терминам карты, выбранные профили располагаются в кустарничковых и кустарничково-зеленомошных сосново-лиственничных лесах.

#### Выводы

Впервые выявлена высокая доля распространения надмерзлотных субаэральных таликов в сосновых лесах западной части Центральной Якутии на участке от г. Якутска до г. Вилюйска на расстоянии более 360 км. С помощью георадиолокации талики были обнаружены на девяти профилях из 37. Если допустить, что выявленная доля надмерзлотных исследованных профилях распространения таликов на репрезентативна для типа растительности «кустарничковые и кустарничково-зеленомошные сосново-лиственничные леса», которые занимают 26 % вдоль ФАД «Вилюй», то таликовость региона составляет более 6 % только за счет субаэральных таликов. Эта оценка не включает в себя субаквальные талики и превышает ранее опубликованные в литературе сведения о таликовости региона как минимум в полтора раза. Надмерзлотные субаэральные водоносные талики могут представлять интерес как круглогодично действующий водоснабжения.

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ (проекты 20-05-00670 и 20-35-70027).

- 1. Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования / Отв. ред. Н.П. Анисимова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 2003. 117 с.
- 2. Романовский Н.Н. Подземные воды криолитозоны / Под ред. В.А. Всеволожского. М.: МГУ, 1983. 232 с.
- 3. Бойцов А.В. Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1985. С. 44–55.
  - 4. Бойцов А.В. Геокриология и подземные воды криолитозоны. Тюмень: Изд-во ТюмГНГУ, 2011. 177 с.
- 5. Мониторинг подземных вод криолитозоны / В.В. Шепелев, А.В. Бойцов, Н.Г. Оберман и др. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. 172 с.
- 6. Мерзлотно-ландшафтная карта Республики Саха (Якутия). Масштаб 1: 1 500 000 / Ред. М.Н. Железняк. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2017.
- 7. Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М. Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. № 1. с. 40–50 DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50).

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НАДМЕРЗЛОТНЫХ ТАЛИКОВ НА НАМЫВНОЙ ТЕРРИТОРИИ Г. ЯКУТСКА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-292-295

Огонёров В.В., Павлова Н.А.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, vasvas392@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены мерзлотно-гидрогеологические условия городского квартала г. Якутска, построенного на намывных грунтах в пойме р. Лены. Установлено, что в пределах намывной территории от начала гидромеханизированных работ до настоящего времени сохраняется несливающийся тип мерзлоты. Нижние слои намывных песков и подстилающие их грунты естественного сложения обводнены. Мощность водонасыщенного слоя изменяется от 0.5 до 12.0 м и более. Свободная поверхность надмерзлотных грунтовых вод залегает на глубинах 6.5–13.0 м и испытывает сезонные колебания, синхронные с уровнем р. Лены. Химический состав надмерзлотных вод под намывным массивом близок к составу воды подруслового талика р. Лены и речной воды в зимний период. Постоянная фильтрация воды в основании намывной толщи может рассматриваться как фактор, препятствующий промерзанию грунтов оснований снизу.

**Ключевые слова:** р. Лена, намывная территория, талики, надмерзлотные грунтовые воды, уровень и химический состав подземных вод.

**Abstract.** Permafrost-hydrogeological conditions of the city quarter of Yakutsk, built on alluvial soils in the floodplain of the river, are considered Lena river. It has been established that the non-flowing type of permafrost remains within the alluvial territory from the beginning of hydromechanized works to the present day. The lower layers of alluvial sand and the underlying soils of natural constitution are watered. The thickness of the water-saturated layer varies from 0.5 to 12 meters or more. The free surface of the suprapermafrost groundwater lies at depths of 6.5-13 m and experiences seasonal fluctuations synchronous with the level in the Lena river. The chemical composition of the suprapermafrost waters under the alluvial mass is close to the composition of the water of the underflow talik of the Lena river and river water in winter. Permanent filtration of water at the base of the reclaimed strata can be considered as a factor preventing the basement soils from freezing from below.

**Keywords:** Lena river, hydraulic fill, taliks, suprapermafrost water, groundwater level and chemical composition.

При гидрогеологической и инженерно-геологической оценке пойменных намывных территорий непременным объектом исследований является гидродинамической режим подземных вод, как существующих до намыва, так и появившихся при создании грунтового основания. Особенно важно эти исследования проводить в области криолитозоны, поскольку гидрогеологические условия могут стать решающим аргументом при выборе принципа использования грунтов в качестве оснований.

На территориях, охваченных многолетним промерзанием пород, намывные грунты обычно используют при строительстве дорог, аэродромов, трубопроводов, дамб, различных объектов нефтегазового комплекса [1-7]. Как правило, эксплуатация инженерных сооружений на намывных грунтах происходит здесь по первому принципу. Этот принцип подразумевает, намытые и подстилающие грунты должны находиться многолетнемерзлом состоянии в процессе строительства и в течение всего периода эксплуатации сооружений. Первый принцип использования грунтов первоначально выбран и при возведении жилого массива на намывной территории в г. Якутске – крупнейшем городе, расположенном в области сплошного развития многолетнемерзлых пород [4, 5]. Основные объемы по намыву территории низкой поймы под застройку 202-го квартала г. Якутска осуществлялись в 1978-1988 гг. В 1990-1992 гг. и в 2012 г. намывались недостающие объемы 203-го квартала грунтами руслового аллювия. Возведение жилого массива на намывных грунтах в области криолитозоны было проведено впервые и остается пока единственным опытом строительства в подобных условиях. Как показали исследования, выполненные в 2013-2019 гг., на территории 202-го квартала соотношение талых и мерзлых грунтов оснований примерно одинаково, а на территории 203-го квартала грунты до глубины 10 м и более имеют положительные температуры. Одной из причин сохранения таликов на погребенной пойменной территории является наличие рядом полноводной р. Лены и подрусловых таликов под ней.

Для выявления особенностей взаимосвязи подземных и поверхностных вод, а также их роли в формировании геоэкологической обстановки были организованы режимные гидрогеологические, гидрохимические и геотермические наблюдения на территории 203-го квартала г. Якутска. Изучение режима подземных вод проводится с 2014 г. До 2016 г. наблюдательная сеть состояла из четырех гидрогеологических скважин. Две их них пробурены на участках реликтовых подозерных таликов, две других – в местах погребенных прирусловых валов. Наблюдения за изменением уровня подземных вод проводились с периодичностью один раз в месяц с учащением замеров во время весеннего половодья. Данные, полученные в этот период, характеризуют гидрогеологический режим подземных вод до начала ввода в эксплуатацию зданий и подземных коммуникаций. В 2016 г. при застройке территории три скважины были ликвидированы. В 2019 г. рядом с объектами капитального строительства были пробурено пять гидрогеологических скважин. Одна из них (скважина 10) оборудована датчиками автоматической регистрации уровня. Для изучения гидрохимической обстановки пробы воды из скважин и из р. Лены отбирались один раз в месяц в первый год наблюдений, затем один раз в квартал. Аналитические исследования водных проб выполнены в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН методами титрометрии и капиллярного электрофореза. Рядом с гидрогеологическими были пробурены геотермические скважины. Для измерения температуры грунтов использовались переносные косы, оборудованные датчиками через 0.5 м до глубины 5 м, далее через один метр до глубины 10 м. Геотермические наблюдения осуществлялись с периодичностью один раз в месяц.

Намывная территория 203 квартала г. Якутска ограничена с запада уступом первой надпойменной террасы р. Лены, с севера — городской дамбой, а с востока — Городской протокой. Средний годовой сток реки у г. Якутска 7070 м³/с, годовая амплитуда изменения уровня воды р. Лены достигает 7–11 м [8, 9]. Под руслом и на пойме р. Лены в районе г. Якутска развиты надмерзлотные фильтрационные талики. Под протоками, имеющими постоянный сток, талые водонасыщенные породы прослеживаются до глубины 40–60 м [10]. Под пересыхающими и перемерзающими протоками, а также старичными озерами на пойме реки мощность водоносного горизонта не превышает 10–12 м. Водоупором для надмерзлотных вод служат многолетнемерзлые породы.

До намывных работ в районе 203-го квартала г. Якутска имелось два старичных озера шириной 100–120 м. Мощность надмерзлотных водоносных таликов под ними составляла 7–10 м. При устройстве намывного основания старичные озера были погребены под 10–15-метровым слоем техногенного грунта. На межозерных увалах за счет высокой температуры пульпы произошло углубление кровли многолетнемерзлых пород и под 6–8-метровой толщей техногенного грунта сформировались искусственные водонасыщенные талики мощностью до 3–5 м.

Как показали исследования 2014-2020 гг., на территории 203 квартала г. Якутска надмерзлотные грунтовые воды распространены практически повсеместно. Они вскрыты скважинами на глубине 6.4–13.0 м [7]. Подземные воды безнапорны. Мощность обводненной толщи, в зависимости от отметок кровли криогенного водоупора, изменяется от 0.5-6.0 м на участках погребенных увалов до 12 м и более на площадях замытых старичных озер. Свободная поверхность надмерзлотных грунтовых вод испытывает сезонные колебания (рис. 1). Ее самые низкие отметки отмечаются в марте – начале мая и соответствуют периоду зимней межени в р. Лене. Уровень речных вод в это время залегает на 3-4 м ниже, чем у надмерзлотных таликовых вод на намывной территории. В мае, с первой волной половодья, происходит быстрый подъем уровня воды р. Лены. В течение 7–17 сут абсолютные отметки поверхности речных и надмерзлотных грунтовых вод выравниваются. Затем в условиях начинается интенсивное питание подземного водоносного поверхностными водами р. Лены и повышение зеркала надмерзлотных грунтовых вод на 1.5-3.5 м относительно меженного. В конце июня – начале июля на фоне спада уровней речных вод урез р. Лены перемещается на 1 км от намывного массива. При этом уменьшается гидравлический градиент между подземными водами, развитыми на пойме, и рекой. В этих условиях происходит медленное осушение грунтов намывного массива, продолжающееся до следующего паводка.

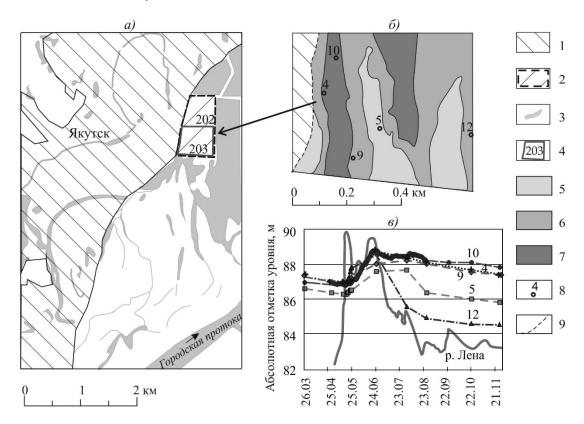
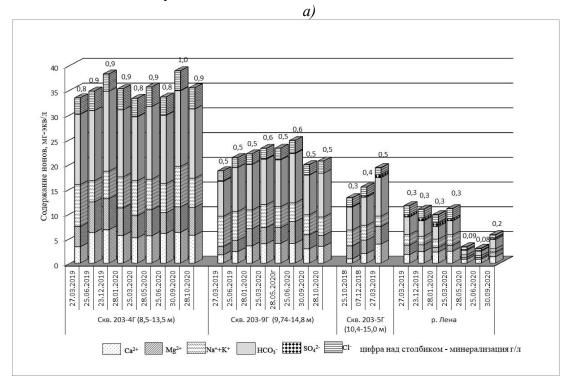


Рис. 1. Фрагмент территории г. Якутска (a), мерзлотно-гидрогеологическая схема 203-го квартала (по состоянию на 2015–2019 гг.) ( $\delta$ ) и изменения уровня воды р. Лены у г. Якутска и подземных вод в гидрогеологических скважинах на намывной территории в 2019 г. ( $\epsilon$ ). I – территория города на низкой надпойменной террасе р. Лены; 2 – пойменно-намывная территория; 3 – водотоки и водоемы; 4 – территория исследований; 5 – область распространения надмерзлотных вод сезонноталого слоя; 5–7 – надмерзлотные талики с грунтовыми водами: 5 – мощность таликов 10–15 м, 6 – мощность таликов 15–20 м; 7 – мощность таликов более 20 м; 8 – режимная гидрогеологическая скважина и ее номер; 9 – граница между поймой и первой надпойменной террасой р. Лены.

На намывной территории подземные воды имеют химический состав, близкий к составу вод подруслового талика под р. Леной и речной воды в зимний период (рис. 2). По химическому типу это хлоридно-гидрокарбонатные смешанные по катионам воды. В разрезе распределение минерализации носит характер стратификации: более низкая соленость воды характерна для верхних водоносных слоев, в нижних частях талика содержание растворенных веществ в воде увеличивается без изменения ее химического типа. Минерализация подземных вод непостоянна в течение года. Ее максимальные величины (0.6–0.8 г/л) отмечаются в марте – мае. В летний период при фильтрации в намывной массив ультрапресных вод р. Лены происходит уменьшение минерализации подземных вод до 0.4–0.5 г/л.

В паводковый период действуют два основных механизма насыщения грунтов водой. Первый — это боковая фильтрация речных вод по контуру намывного массива. Зона его влияния ограничивается 150–170 м от водотока. Второй — передача гидравлического давления от реки по подрусловому талику, который взаимосвязан с техногенным надмерзлотным водоносным горизонтом. Влияние второго механизма прослеживается по всей изучаемой территории. Скорость распространения гидродинамического импульса от

реки по водоносному горизонту, рассчитанная по данным режимных наблюдений, составляет около  $4.6\cdot10^3$  м<sup>2</sup>/сут.



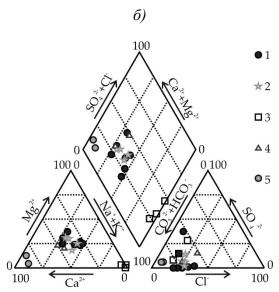


Рис. 2. Химический состав природных вод на территории исследований (a) и диаграмма Пайпера ( $\delta$ ): 1–3 подземные воды надмерзлотных таликов: 1 — техногенных таликов под намывными грунтами, 2 — подрусловых таликов р. Лены в четвертичных отложениях, 3 — подрусловых таликов р. Лены в юрских отложениях; 4 — поверхностные воды р. Лены в зимний период, 5 — атмосферные осадки.

Фильтрующиеся по таликам подземные воды насыщают грунты снизу, изменяя их теплофизические свойства. Изучение гидравлического взаимодействия реки с надмерзлотными грунтовыми водами является особенно актуальным при наблюдаемых в последние десятилетия колебаниях климата, способных привести к увеличению количества аномальных паводков, и, соответственно, вызвать подтопление грунтов оснований инженерных сооружений.

Как отмечают многие исследователи, в Центральной Якутии с 1980-х гг. наблюдается повышение средней годовой температуры приземного воздуха в основном за счет сокращения продолжительности зимнего периода [11–13]. Следовательно в ближайшие десятилетия увеличение мощности сезонномерзлого слоя и слияние его с многолетнемерзлыми породами маловероятно.

пойменно-намывной Таким образом, на территории водоносные талики, сформировавшиеся в период проведения гидромеханизированных работ, при существующих природных условиях сохраняются более 25 лет. Режим подземных вод пойменных таликов подчинен гидрологическому режиму р. Лены. Постоянная фильтрация воды в массиве грунтов приводит к тепловому эффекту, препятствующему многолетнему промерзанию пород снизу и сохранению несливающегося типа мерзлоты. Количественно оценить роль водоносных таликов в формировании геотермического режима грунтов оснований в условиях сложного движения подземных вод является задачей дальнейших режимных Выявленные особенности необходимо учитывать при планировании наблюдений. стратегического освоения пойменных территорий крупных рек криолитозоны, а также при оценке рисков подтопления оснований инженерных сооружений на намывных площадях подземными водами под воздействием паводков.

Работа выполнена частично при поддержке РФФИ (проекты №18-45-140065 и № 20-05-00670).

- 1. Kitze F.F., Simoni O.W. An Earth Fill Dam on Permafrost, Hess Creek Dam, Livengood, Alaska. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1972. 51 p.
- 2. Mitchell D.E., McRae T.E. Densification of Submarine Hydraulic Fills. Proc., Offshore Technology Conference, 1985 Houston, Texas DOI: 10.4043/4920-MS.
  - 3. Коновалов П.А., Кушнир С.Я. Намывные грунты как основания сооружений. М.: Недра, 1991. 256 с.
- 4. Полещук В.Л. Подготовка площадок строительства на вечной мерзлоте способом намыва грунтов оснований // Мат-лы науч. совещ. по развитию производительных сил Якутской АССР. Якутск, 1981. С. 10–15.
- 5. Роман Л.Т. Цернант А.А., Полещук В.Л., Цеева А.Н., Леванов Н.И. Строительство на намывных грунтах в криолитозоне. М.: Издательский дом: Экономика, Строительство, Транспорт. 2008. 323 с.
- 6. Чжан Р.В., Великин С.А., Кузнецов Г.И., Крук Н.В. Грунтовые плотины в криолитозоне России. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2019. 427 с.
- 7. Pavlova N. Ogonerov V. Danzanova M. Popov, V. Hydrogeology of Reclaimed Floodplain in a Permafrost Area, Yakutsk, Russia // Geosciences. 2020. 10(5). 192 p. https://doi.org/10.3390/geosciences10050192.
- 8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17. Лено-Индигирский бассейн / Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 562 c.
- 9. Рождественский А.В., Бузин В.А. Условия формирования и вероятные значения наивысших уровней воды р. Лена у г. Якутск // Метеорология и гидрология. 2010. № 10. С. 77–87.
- 10. Балобаев В.Т., Иванова Л.Д., Никитина Н.М., Шепелев В.В., Ломовцева Н.С., Скутин В.И. Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 137 с.
- 11. Скачков Ю.Б. Тенденции изменения экстремальных значений температуры воздуха в г. Якутске // Наука и образование. 2012. № 2. С. 39–41.
- 12. Варламов С.П., Скрябин П.Н., Скачков Ю.Б. Геотемпературный мониторинг грунтов долины Туймаада // Научное обеспечение решения ключевых проблем развития г. Якутска: Мат-лы совместной научной сессии АН РС(Я) и городского округа «Город Якутск». Якутск: ООО «Изд-во Сфера», 2010. С. 97–102.
- 13. Iijima Y., Park H., Suzuki K., Yabuki H., Ohata T., Fedorov A.N., Maximov T.C. Abrupt Increases in Soil Temperatures Following Increased Precipitation in a Permafrost Region, Central Lena River Basin, Russia // Permafrost and Periglacial Processes. 2010. 2(1). 30–41 https://doi.org/10.1002/ppp.662.

## ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ ОКИНСКОГО ПЛОСКОГОРЬЯ ВОСТОЧНОГО САЯНА (НА ПРИМЕРЕ ДОЛИНЫ Р. СЕНЦА)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-297-299

Светлаков А.А., Пеллинен В.А.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, sir.swetlackov@yandex.ru

**Аннотация.** Термический режим многолетнемерзлых грунтов долины р. Сенца Окинского плоскогорья отражает современное повышение температуры как атмосферного воздуха, так и грунтов на поверхности. Основные изменения происходят в области сезонно-талого слоя, где температура имеет положительный тренд, но остается отрицательной. Основным локальным фактором на данной территории являются водотоки и водоемы, оказывающие дополнительное отепляющее воздействие на развитие многолетнемерзлых грунтов.

Ключевые слова: термический режим грунтов, многолетнемерзлые породы, сезонноталый слой.

**Abstract.** Thermal regime of permafrost soils in the river valley. The Sentsa of the Okinsky plateau reflects the current rise in temperature of both the atmospheric air and soils on the surface. The main changes occur in the area of the seasonally thawed layer, where the temperature has a positive trend, but remains negative. The main local factor in this area is streams and reservoirs, which have an additional warming effect on the development of permafrost soils.

**Key words:** Thermal regime of soils, permafrost, seasonally thawed layer.

Проблема формирования криолитозоны в условиях современного изменения климата остается актуальной и привлекает многих исследователей различного профиля. Важным показателем современного состояния криолитозоны является температура многолетнемерзлых грунтов, особенно в пределах южной геокриологической зоны, где изменение внешних условий приведет к нарушению температурных процессов в массиве мерзлых толщ. Особые геокриологические условия формирования многолетнемерзлых грунтов в пределах Окинского плоскогорья, а также их трансформация в современном периоде позволяют оценить состояние геологической среды Восточного Саяна.

Основной целью работы является оценка современного теплового состояния грунтов Окинского плоскогорья в Восточных Саянах, а также определение динамики мерзлых толщ. Для определения современного термического режима грунтов использовался метод температурных замеров в скважинах с применением термодатчиков (логгеров): Onset Computer Corporation – HOBO U12-008 и HOBO UA-001-64. HOBO U12-008, точность:  $\pm 0.2~^{\circ}$ C от 0° до 50 °C и HOBO UA-001-64 Pendant Temperature/Alarm (Waterproof) Data Logger, точность:  $\pm 0.5~^{\circ}$ C от 0 до 50 °C.

Окинское плоскогорье расположено в восточной части Восточного Саяна на высоте 1800-2400 м над уровнем моря и является водосбором Иркута, Оки, Китоя, Урика. Приток р. Оки – Сенца – прорезает Окинское плоскогорье на глубину 800 м. Долина р. Сенца представляет собой классический трог с элементами ледникового рельефа в виде боковых и конечных морен позднеплейстоценового возраста [1]. Данная территория относится к области прерывистого и сплошного распространения многолетнемерзлых грунтов южной геокриологической зоны. В горных районах многолетнемерзлые породы представлены в мраморами, метаморфизованными известняками и основном сланцами, гнейсами, доломитами, в межгорных впадинах мерзлыми грунтами являются различные рыхлые пески, дресва, галька, щебень, суглинки глины. отложения многолетнемерзлых грунтов в области их прерывистого распространения варьируется от 50 до 100 м, среднегодовая температура – от -0.5 до -2.0 °C, в области сплошного распространения – от 140-200 до 1000 м, а температура мерзлых грунтов изменяется от -2 до -10 °C [2, 3].

Окинское плоскогорье характеризуется резко континентальным климатом, в течение года температура воздуха изменяется от +41.0 до -46.2 °C. За последние 50 лет отмечается положительный тренд температуры воздуха. Его среднегодовая температура повысилась от -6.4 до -2.3 °C, что, безусловно, оказывает влияние на тепловое состояние мерзлых грунтов, ежегодный прирост температуры составляет 0.017 °C [4].

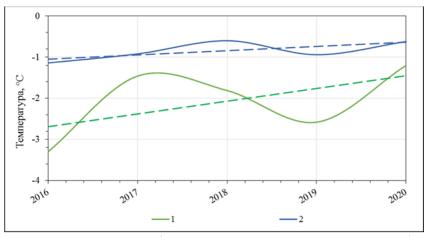
Исследования температурного режима грунтов проводились с 2014 по 2020 г. в пределах межгорной озерной котловины на левом берегу р. Сенца в 800 м юго-восточнее летника Шаснур. В пределах исследуемого участка температура воздуха имеет отрицательное среднегодовое значение и варьируется от -1.2 до -3.3 °C. В годовом цикле температура изменяется от +22.8 до -39.1 °C, что способствует сохранению многолетнемерзлых грунтов на данной территории.

Переход к отрицательным значениям температуры воздуха происходит в конце сентября, а устойчивая суточная отрицательная температура наступает только в середине октября. В ноябре происходит резкое понижение температуры воздуха до -20...-30 °C. Отрицательная температура грунтов на отметке 0.1 м устанавливается в ноябре, за месяц температура опускается до -20.8 °C, что приводит к полному промерзанию грунтов сезонноталого слоя. Такое резкое понижение температуры грунтов у поверхности связано с особенностями резко континентального климата, а также отсутствием снежного покрова, формирование которого начинается только во второй половине ноября и в течение зимнего периода не превышает 0.1 м.

Положительная температура воздуха фиксируется в конце марта, в апреле она устанавливается и повышается до 6–15 °C. Незначительный снежный покров тает в марте, протаивание многолетнемерзлых грунтов начинается с середины апреля, после установления положительных среднесуточных температур воздуха. Положительная температура грунтов на отметке 0.1 м устанавливается в мае, за месяц температура поднимается до 8.5 °C. Растительный покров долины р. Сенца представлен сочетанием прирусловых зарослей кустарников с травянистыми осиново-тополево-лиственничными лесами в основном по бортам долины, суходольные разнотравные луга с луговыми степями распространены на внутрипойменных и надпойменных террасах [5]. В пределах участка исследования растительный покров представлен в основном степными и луговыми травами, а также небольшими лиственничными массивами, которые слабо защищают поверхность грунтов от прогрева.

Термический режим указывает на то, что протаивание многолетнемерзлых грунтов в естественных условиях на территории долины р. Сенца проходит без значительных задержек. Максимальная глубина протаивания достигает 1.0–1.5 м, что хорошо коррелируется с данными для Окинского плато [2]. Промерзание оттаявшего слоя происходит интенсивнее, среднегодовая температура на глубине 0.1 м варьируется от –1.9 до –2.9 °С, что является достаточным условием для сохранения мерзлых грунтов на данный момент. Но в условиях современного изменения климата и сохранения положительного тренда среднегодовых температур атмосферного воздуха создаются предпосылки для деградации многолетнемерзлых грунтов.

На глубине 1.0 м переход от отрицательных значений температур к положительным происходит в конце июня, последние сохраняются до конца ноября. Максимальная температура на данной глубине отмечена в августе и составляет 2.9 °C, пик минимальной температуры составляет –4.6 °C и отмечается в феврале. Среднегодовая температура на глубине 1.0 м за весь период исследований имеет положительный тренд, который варьируется в пределах от –0.6 до –1.1 °C (рисунок). Тренд температур грунтов на отметке 1.0 м имеет более пологий вид и соответствует тренду температуры атмосферного воздуха, при этом температура грунтов варьируется в диапазоне, близком к нулю, что при сохранении данной тенденции приведет к положительным среднегодовым температурам на глубине 1.0 м. Стоит отметить, что амплитуда колебаний грунтов на поверхности составляет до 20 °C, среднегодовая температура грунтов в пределах границы сезонного протаивания достигает 1.0 °C, что позволяет отнести грунты к полупереходному повышеноконтинентальному типу сезонного протаивания по В.А. Кудрявцеву [6]. Ранее отмечались более устойчивые типы сезонного протаивания [2], и данное изменение указывает на смещение температуры кровли мерзлых грунтов в сторону положительных значений.



Среднегодовая температура: I – атмосферного воздуха; 2 – грунтов на глубине 1.0 м. Линии: сплошная – значение температуры, прерывистая – тренд.

Многолетнемерзлые грунты отличаются невысокими отрицательными значениями температуры. Ниже глубины годовых нулевых теплооборотов на отметке 19.5 м среднегодовая температура с 2016 по 2020 г. оставалась стабильной и составила –1.0 °C. Согласно Л.Н. Соловьевой, величина геотермического градиента для территории Восточного Саяна изменяется от 1.0 до 1.5 °C на 100 м [7] и соответствует данным, приведенным ранее [2]. Геотермический градиент и среднегодовая температура мерзлых грунтов позволяют отнести территорию участка исследования к области прерывистого распространения многолетнемерзлых грунтов, где сплошность мерзлоты нарушается поверхностными водотоками и водоемами, которые оказывают дополнительное отепляющее воздействие [2, 8]. Значительное влияние поверхностные водотоки оказывают на деградацию мерзлых грунтов в области береговой зоны, а также на участках подтопления в паводковые периоды. На данных участках происходит дополнительное протаивание грунтов до 3.6 м. Наличие подруслового талика под р. Сенца остается дискуссионным.

#### Выводы

Изменение климатических условий на данной территории пока не оказывает существенного влияния, хотя наметившийся тренд температуры атмосферного воздуха и грунтов на поверхности указывает на изменение термического режима и смещение к 0 °С. Также происходят изменения в области сезонно-талого слоя, где формируются условия переходного типа, что указывает на больший прогрев грунтов и, как следствие, приведет к увеличению мощности сезонно-талого слоя. Дополнительное отепляющее воздействие оказывают поверхностные водотоки и водоемы, являющиеся основными локальными факторами, привносящими значительный вклад в процесс изменения термического режима многолетнемерзлых грунтов.

Исследование выполнено при поддержке  $P\Phi\Phi U$  и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-380002 р\_а.

- 1. Олюнин В.Н. Неотектоника и оледенение Восточного Саяна. М.: Наука, 1965. 127 с.
- 2. Геокриология СССР. Горные страны юга СССР. М.: Недра, 1989. 359 с.
- 3. Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР. М.: Недра, 1970. 432 с.
- 4. Интернет ресурс http://gis.ncdc.noaa.gov/map, дата обращения 20.10.2019 г.
- 5. Холбоева С.А. Структура растительного покрова Окинского плоскогорья (Восточный Саян) // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Серия: Биологические науки. 2011. №. 1.
- 6. Кудрявцев В.А., Достовалов Б.Н., Романовский Н.Н., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. Общее мерзлотоведение: Учебное пособие. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. 464 с.
- 7. Соловьева Л.Н. Морфология криолитозоны Саяно-Байкальской области. Новосибирск: Наука, 1979. 126 с.
- 8. Светлаков А.А. Особенности температурного режима грунтов в условиях южной геокриологической зоны Восточной Сибири: Дис... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 2018. 153 с.

# СТРУКТУРНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В РАЙОНАХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД (НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИРАКИНДА, РЕСПУБЛИКА БУРЯТИЯ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-300-303

Тугарина М.А.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, tugarina\_ma@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются основные факторы формирования водопритоков в горные выработки рудных месторождений, расположенных в районах многолетней мерзлоты, на примере месторождения Иракинда в Республике Бурятия. Основными в условиях обводнения месторождений являются структурногеологические и физико-географические факторы, которые предопределяют проницаемость и водообильность гидрогеологических структур. Формирование водопритоков в горные выработки определяется и наличием многолетнемерзлых пород. Установлено, что выработки в мощной (до 250–350 м) толще многолетней мерзлоты, как правило, сухие. Водоносными являются разломные зоны, с которыми связаны сквозные талики и долины водотоков, и рыхлые четвертичные отложения несквозных таликов. Напорные трещинно-жильные воды вскрываются скважинами ниже подошвы многолетней мерзлоты в интервале абсолютных отметок 850–900 м.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, водоприток, разломная зона.

**Abstract.** The main factors of the water inflow formation into the mines of ore deposits located in permafrost regions are considered, using the example of the Irakinda deposit in the Republic of Buryatia. The primary factors are structural and geological, physical and geographical factors which predetermine the presence and permeability of hydrogeological structures as well as the conditions for their watering. The formation of water inflows into mines is determined by permafrost spread. It has been established that mine workings in a thick strata of permafrost (up to 250-350 m) usually are dry. The main water-bearing structures are the fault zones which are associated with through taliks and surface watercourse valleys, and loose Quaternary sediments of blind taliks. Pressure fissure-vein waters are opened by wells below the permafrost bottom in the range of 850-900 m of absolute height.

Key words: permafrost, water influx, fault zone.

Вопросы обводнения горных выработок остаются актуальными практически для всех сибирских месторождений твердых полезных ископаемых. Это необходимо как для организации безопасного ведения горно-геологических работ, так и для обеспечения соответствия требованиям ГКЗ к содержанию материалов при подсчете кондиций и запасов полезных ископаемых.

Среди основных факторов формирования водопритоков в горные выработки рудных месторождений первоочередными являются структурно-геологические и физико-географические. В последней группе ведущими выступают природно-климатические и ландшафтные, которые предопределяют не только количество атмосферных осадков и условия их проникновения в горные породы, но и наличие или отсутствие многолетнемерзлых пород.

На территории Муйского района в зоне Байкало-Амурской магистрали выявлены и разрабатываются разнообразные месторождения полезных ископаемых — хризолит-асбеста, золота, нефрита, строительных материалов, доломитов и других, главными из которых, обеспечивающими экономическую стабильность региона, являются месторождения рудного и россыпного золота, платины, олова, серебра, поделочных и облицовочных камней.

Исследуемый район расположен к северо-востоку от оз. Байкал в южных отрогах Южно-Муйского хребта, входящего в систему Станового нагорья, на левом склоне долины р. Иракинда. Альпинотипный рельеф сменяется от высокогорного глубокорасчлененного в северной части к среднегорному таежному ландшафту — в южной, с крутизной склонов 30–40°, с большим количеством остроконечных вершин и преобладающей высотой гор 1200–2000 м. Горные массивы разделены небольшими по площади и вытянутыми межгорными впадинами, которые в структурном отношении представляют собой грабенообразные зоны

крупных региональных разломов. Относительные превышения водоразделов над днищами долин достигают 700–1000 м.

Несмотря на сильную расчлененность рельефа, обнаженность пород района весьма слабая. На склонах широко развиты крупноглыбовые курумы, которые бронируют склон. Мощность рыхлых склоновых отложений колеблется от 2.0 до 5.0 м, достигая 10 м.

Гидрографическая сеть представлена р. Иракинда и ее притоками, длиной менее 10 км каждый. Средний коэффициент густоты речной сети равен 0.88 км/км². Река Иракинда с ее многочисленными притоками берет начало на склонах Южно-Муйского хребта и впадает в реку Тулдунь (бассейн р. Витим), текущую на северо-восток. Длина реки 44 км, водосборная площадь 300 км². Питание реки осуществляется за счет атмосферных осадков, в основном летних дождей, а также за счет оттаивания мерзлоты, что сказывается на непостоянстве ее режима. Постоянный ледовый покров устанавливается в октябре — ноябре и сохраняется до мая.

Климат района резко континентальный с суровой продолжительной зимой и коротким жарким летом. Среднегодовая сумма осадков составляет 402 мм при колебаниях в отдельные годы от 256 до 725 мм. До 72 % осадков выпадает в летний период, на зимние месяцы приходится всего 2.5 % годовой суммы осадков. Снежный покров устанавливается с третьей декады октября и сохраняется до второй декады апреля. Незначительная глубина снежного покрова, от 10 до 25 см, ведет к большой глубине (до 4.0 м) сезонного промерзания грунтов и развитию многолетнемерзлых пород. Глубина сезонного оттаивания грунтов изменяется от 0.5 до 1.5 м в зависимости от экспозиции склонов. Многолетняя мерзлота, нижняя граница которой достигает 300-400 м, распространена повсеместно. Ее мощность в осевых частях хребтов составляет 800-900 м, а температура горных пород достигает -8 °C. По данным предшественников, температурный градиент в толще кристаллических пород изменяется от 0.9 до 1.2 °C на 100 м и лишь в отдельных случаях достигает 2.4 °C. В долинах, по которым спускались ледники, мощность мерзлой толщи составляет 50–150 м. На некоторых участках речных долин многолетняя мерзлота прорывается сквозными подрусловыми и пойменными таликами [1]. В долинах рек в толще аллювия отмечаются таликовые зоны островного характера, сформированные, по-видимому, тепловым потоком по крупным разломным зонам. Глубина сезонного оттаивания не превышает 1.5–2.0 м на склонах южной экспозиции и 0.5-1.0 м – северной. Температура многолетнемерзлых пород составляет -4...-6 °C.

Площадь Иракиндинского рудного поля в геологическом отношении представляет собой выступ древнего допалеозойского фундамента среди складчатой зоны байкалитов, которому дано название Южно-Муйской глыбы. В ее составе преобладают глубоко метаморфизованные породы, гнейсы различного состава, разнообразные магматиты и, в меньшей степени, кальцифиры и кристаллическе сланцы. Стратифицированные образования представлены архейскими, нижнепротерозойскими, верхнепротерозойскимми и четвертичными образованиями.

Во внутренней структуре Южно-Муйской глыбы выделяется Центральная синклиналь и Западная антиклиналь субмеридиональной ориентировки. Центральная синклиналь представляет собой складку сложного строения, протягивающуюся через всю площадь с юга на север. Крылья ее осложнены субпараллельными складками высоких порядков и разрывными нарушениями. Западная антиклиналь рассечена разрывными нарушениями и прослеживается лишь в виде отдельных фрагментов.

Структурное положение рудного поля в региональном плане определяется тремя главными разрывными структурами: Иракиндинским глубинным разломом с запада, Озерно-Серебряковским разломом – с востока и Верхнекиндиканской зоной нарушений – с севера.

Иракиндинский разлом представляет собой тектоническую зону с очень сложным внутренним строением и проявляется в виде мощной полосы милонитов и бластомилонитов, в пределах которой выделяются субпараллельные тектонические швы, напоминающие зоны рассланцевания. Мощность отдельных разрывов в этой зоне колеблется от нескольких метров до десятков и сотен метров. Падение плоскостей сместителей разрывов на юго-запад

под углами от 50–60 до 75–80°. Озерно-Серебряковский разлом также является крупной и протяженной структурой северо-восточной ориентировки. Он состоит из серии разрывов с падением плоскостей сместителей на северо-запад и юго-восток.

Помимо указанных крупных разрывных структур, в районе установлена густая сеть более мелких разломов, создающих боковую структуру площади. Большая часть этих разломов, ориентированная субпараллельно Иракиндинской и Озерно-Серебряковской зонам, имеет разнообразные по крутизне падения углы и протяженность от сотен метров до нескольких километров.

Рудное поле имеет ясно выраженное блоковое строение, причем границы блоков определяются, как правило, зонами разрывных нарушений и охватывают три сочлененных блока: Иракиндинский, Киндиканский и Западный. Общий структурный рисунок рудного поля определяется сочетанием трех систем разрывных нарушений, именуемых «рудовмещающими структурами». Именно в этих структурах, различных по масштабам и ориентировке, локализованы золотокварцевые жилы. Породы устойчивые, находятся в многолетнемерзлом состоянии при температуре от –4 до –6 °C. При оттаивании устойчивость снижается, а на участках пересечения тектонических зон возможны заколообразования и отслоения от массива горных пород в бортах выработок.

В гидрогеологическом отношении исследуемый участок работ расположен в пределах Байкало-Муйской гидрогеологической складчатой области [2]. Природные условия исследуемого района в целом неблагоприятны для формирования и широкого распространения подземных вод. Малое количество атмосферных осадков на большей части площади, горный интенсивно расчлененный рельеф, наличие мощной толщи многолетней мерзлоты и преобладание в разрезе массивных кристаллических пород создают условия для слабого обводнения горных выработок.

Мерзлые и морозные породы распространены на территории очень широко — это рыхлые отложения, промороженные на всю мощность, с редкими несквозными подрусловыми и подозерными таликами и скальные интенсивно дислоцированные породы с промороженной на всю мощность зоной региональной трещиноватости, с редкими сквозными и несквозными таликами, приуроченными к зонам тектонических нарушений.

Исключение составляют сквозные талики, по которым происходит разгрузка подмерзлотных трещинно-жильных вод, а также участки с повышенной мощностью аллювия. В последнем случае воды таких таликов – грунтовые, реже с криогенным напором, создаваемым островами многолетнемерзлых пород. На участках повышенной мощности аллювиальных отложений встречаются меж- и подмерзлотные воды, глубина которых колеблется в значительных пределах. Коэффициент фильтрации пород изменяется от 0.2—10.0 в тонкозернистых песках до 160—200 м/сут – в хорошо промытых галечниках. Удельные дебиты скважин изменяются соответственно от 0.1—0.3 до 7—20 л/с.

Подземные воды сквозных таликов установлены в долинах рек Тулуя и Иракинда. В долине р. Иракинда сквозной талик выявлен в 4 км южнее поселка Иракинда. Здесь подмерзлотные воды, приуроченные к узлу пересечения регионального Иракиндинского и субширотного Озерного разломов, выходят на поверхность виде мощного восходящего родника (источник Тальцы). Минимальный расход этого источника, зафиксированный в декабре 1979 г., составил 0.084 м<sup>3</sup>/с, что существенно ниже естественных ресурсов подмерзлотных вод, поскольку значительная часть расхода идет подземным стоком в аллювий реки, не выходя на поверхность. Так, разведочно-эксплуатационными скважинами водозабора ПАО «Бурятзолото» в 1992 г. до глубины 190 м вскрыты водоносные рыхлые отложения, представленные преимущественно гравийно-галечными разновидностями с песчаным и песчано-глинистым заполнителем, а в интервале 190-200 м были вскрыты не процессами выветривания граниты фундамента межгорной затронутые Продуктивный водоносный горизонт приурочен к рыхлым четвертичным отложениям таликовой зоны долины ручья Рудного, скорее всего тяготеющего к сквозной таликовой зоне р. Иракинда. В целом многолетняя мерзлота существенно влияет на гидрогеологические условия, затрудняя процессы питания, движения подземных вод и условия водообмена. С

другой стороны, наличие многолетней мерзлоты способствует концентрации подземных потоков в таликовых зонах, обеспечивая четкое ограничение путей их движения и емкостей накопления.

Формирование подземных вод в деятельном (сезоннооттаивающем) слое происходит в основном за счет атмосферных осадков, таяния сезонной мерзлоты и наледей. Временные грунтовые потоки надмерзлотных вод приурочены, как правило, к отрицательным формам рельефа, однако нередко они встречаются и на плоских, пенепленизированных водоразделах. Приуроченность надмерзлотных вод к деятельному слою предопределяет характерную режима – сезонность и непостоянство особенность расхода во Немногочисленные родники, дренирующие надмерзлотные воды, функционируют только летом и осенью. Дебиты их постепенно увеличиваются по мере оттаивания деятельного слоя, а летом могут резко изменяться в зависимости от количества выпавших атмосферных осадков. Осенью, с началом промерзания деятельного слоя, дебиты родников постепенно уменьшаются, наблюдается миграция мест разгрузки подземных вод на поверхности. В ноябре – декабре надмерзлотные воды сезонно-талого слоя полностью промерзают. По химическому составу эти воды относятся к типу НСО3, НСО3-С1 натриевых с минерализацией до 0.1 г/дм<sup>3</sup>. С учетом сезонного характера и незначительных естественных ресурсов, надмерзлотные воды деятельного слоя не могут рассматриваться в качестве источника водоснабжения. Мощная толща многолетнемерзлых пород препятствует проникновению в горные выработки этих вод, кроме случаев, когда они поступали в летний период в приустьевые части горных выработок (капежи с суммарным расходом 4-6 л/час с  $1 \text{м}^2$  кровли штольни).

Подземная гидрогеологическая съемка, проведенная в восьми штольнях и шахте на горизонтах 1090, 1040, 1140, 1190 м, показала, что обследованные выработки участков № 3-Петровской, Петровской и Серебряковской жил находятся в толще многолетнемерзлых пород и практически безводны. Незначительные водопроявления в виде ледяных наростов, встреченные на рудоспусках и в приустьевых частях нижележащих горизонтов, повидимому, связаны с проникновением надмерзлотных вод сезонно-талого слоя и дождевых вод. Водосборные канавки всех штольневых горизонтов, ведущие к устьям штолен, сухие, лишь на участке Тулуинском из штольни № 42 гор.1117.4 м наблюдается вытекание воды на отрезке 0.5 м, которая затем уходит в грунт.

Разведочное бурение показало, что напорные подземные воды вскрываются в основном в водоносных зонах тектонической трещиноватости ниже подошвы многолетнемерзлых пород на отметках 870–875 м, в некоторых случаях – до 900 м. Так, на участке жил 3–35 напорные (от 1.5 до 4,0 атмосфер) самоизливающиеся с дебитом 60–100 л/час подземные воды вскрыты на глубине 300–350 м (скважины 86/959, 60/959, пробуренные в штольне 34). На Тулуинском участке самоизливающиеся с дебитом 0.1 л/с напорные (h=175 м) подземные воды были вскрыты на отметке 870 м. При проходке выработок на участках, расположенных под долинами ручьев, с которыми, по-видимому, связаны талики по разломным зонам, водопритоки существенно возрастают (3–4 м³/час в долине руч. Юрасовского и 100 л/час в долине руч. Серебряковского). По химическому составу подземные воды таликов гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-хлоридные натриевые и натриево-кальциевые с минерализацией 0.1–0.3 г/дм³.

Наличие мощной толщи многолетнемерзлых пород, определяющей гидрогеологические особенности месторождения в верхней части геологического разреза (до глубины подошвы мерзлой толщи), обеспечило достаточно простые в гидрогеологическом отношении условия проведения горно-геологических работ на верхних горизонтах шахт. При планировании и проведении разведочных и добычных работ на более глубоких горизонтах необходимо учитывать наличие не только разломных зон в интервалах глубин ниже подошвы многолетней мерзлоты, но и сквозных таликовых зон под руслами рек.

- 1. Геокриология СССР. Средняя Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 414 с.
- 2. Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР / Под ред. А.И. Ефимова. М.: Недра, 1970. 432 с.

#### ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИТИЯ В ПОДМЕРЗЛОТНЫХ ВОДАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-304-307

Федорова С.В., Павлова Н.А.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, veta f@mail.ru, na-pavlova@yandex.ru

Аннотация. На основе обобщения химических анализов проб воды из водозаборных скважин изучено распределение лития в пресных и слабоминерализованных подмерзлотных водах Центральной Якутии. Минимальное содержание лития (до 0.3 мг/л) выявлено в подмерзлотных водах, приуроченных к слаболитифицированным терригенным меловым отложениям. В подмерзлотных водах юрских водоносных комплексов концентрация лития в среднем составляет 0.3–0.4 мг/л. Наиболее обогащены этим элементом (до 1 мг/л) подмерзлотные воды кембрийских отложений, представленных карбонатными разностями. Концентрация лития в подмерзлотных водах существенно снижается на участках сквозных таликов, где существуют условия для инфильтрации поверхностных вод.

**Ключевые слова:** подмерзлотные воды, многолетнемерзлые породы, литий, предельно допустимая концентрация.

**Abstract**. The distribution of lithium has been studied in fresh and low-mineralized subpermafrost waters extracted from wells in Central Yakutia. The minimum lithium concentration (up to 0.3 mg/L) was found in subpermafrost waters associated with the poorly lithified terrigenous Cretaceous deposits. lithium concentration averages 0.3-0.4 mg/L in the subpermafrost waters of the Jurassic aquifers. The subpermafrost waters of the Cambrian deposits, represented by carbonate varieties are most enriched by this element (up to 1 mg/l). For subpermafrost waters the lithium concentration is significantly reduced in the areas of through taliks, where there are conditions for surface waters infiltration.

*Key words:* subpermafrost water, permafrost, lithium, maximum permissible concentration.

В Центральной Якутии использование подмерзлотных вод в хозяйственно-питьевых целях ограничено в связи с повышенным содержанием отдельных элементов, в том числе лития. В эксплуатационных скважинах в районе г. Якутска содержание лития в природных подмерзлотных водах составляет 0.19–0.85 мг/л при предельно допустимой концентрации 0.03 мг/л.

Источником поступления лития в подземные воды могут являться как водовмещающие горные породы, так и морские воды, захороненные в процессе седиментогенеза. Известно, что среднее содержание лития в морских водах составляет  $1.8 \cdot 10^{-5}$  %, что на два порядка выше, чем в речных водах [3]. В горных породах главными минералами-носителями лития являются слюды, которые в процессах гипергенного изменения переходят в глинистые минералы, в результате чего литий получает возможность входить в структуру новообразованных минералов [2]. В минералах глин он присутствует главным образом в виде изоморфной примеси. Некоторая часть лития адсорбируется на поверхности глинистых частиц и тем самым получает возможность мигрировать в подземные воды в виде катиона  $\mathrm{Li}^+$ .

В процессе эволюции при формировании химического состава подземных вод литий способен накапливаться в жидкой фазе до эвтоники. Так, для крепких рассолов Западной Якутии характерна общая тенденция увеличения концентрации лития с ростом минерализации подземных вод, что обусловлено процессом метаморфизации подземных вод в обстановке гидрогеологической закрытости и низких температур. Средняя концентрация лития в литиеносных рассолах Западной Якутии колеблется от 33 до 148 мг/л [4].

В Центральной части Якутского артезианского бассейна подмерзлотные воды первого водоносного комплекса преимущественно пресные, реже слабосолоноватые. Для изучения распределения в них лития были обобщены результаты гидрохимических работ, мерзлотоведения выполненных c 1964 ПО 2018 Γ. сотрудниками Института им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (ИМЗ СО РАН), а также фондовые материалы различных геологических организаций. При обработке данных использовались результаты 251 химического анализа проб воды с минерализацией ≤3 г/л из 107 водозаборных скважин на территории Центральной Якутии (таблица). Большинство опробованных скважин находится в долине Туймаада — левобережном расширении долины р. Лены; здесь же расположен г. Якутск.

Содержание лития в подмерзлотных водах на территории Центральной Якутии

Водовмещающие породы		Минерализация	Содержание лития, мг/л			Кол-во	
Возраст	Литологический состав	(средняя), г/л	Мин.	Макс.	Сред.	скважин	
$K_1$	пески, песчаники	0.98	0.02	0.33	0.12	7	
$J_3$	песчаники	1.11	0.15	0.27	0.18	3	
$\mathbf{J}_2$	песчаники, алевролиты	1.55	0.28	0.48	0.36	2	
$\mathbf{J}_1$	песчаники, алевролиты, аргиллиты	1.31	0.07	0.84	0.31	42	
$J_1 + J_2$	песчаники, алевролиты, конгломераты	1.52	0.14	0.55	0.31	4	
$J_1+C_2$	песчаники, алевролиты, известняки, доломиты, глинистые сланцы, аргиллиты	1.30	0.10	0.85	0.34	25	
$\epsilon_2$	известняки, доломиты, мергели	1.62	0.13	1.16	0.59	21	
$\epsilon_{\scriptscriptstyle 1}$	известняки, доломиты	1.43	0.66	1.02	0.80	3	

Водоносный комплекс нижнемеловых пород  $(K_I)$  развит в северной части изучаемой территории. Литологический состав пород комплекса представлен толщей переслаивающихся алевролитов, аргиллитов, глин, песков, песчаников и углей. Обводненные породы вскрыты под толщей многолетнемерзлых пород с глубины 270 м.

По химическому составу подмерзлотные воды гидрокарбонатно-хлоридные или гидрокарбонатные натриевые с минерализацией от 0.6~г/л (скважина в пос. Модутцы) до 1.1~г/л в районе оз. Мюрю (пос. Борогонцы). Концентрация лития в них изменяется от 0.02~до 0.33~мг/л при среднем ее значении 0.12~мг/л [5].

Водоносный комплекс верхнеюрских пород (*J*<sub>3</sub>) наиболее изучен в районе Кангаласского угольного месторождения. Несколько скважин вскрыли его в бассейне р. Татты и на Лено-Вилюйском водоразделе. В северной части территории рассматриваемые отложения погружаются под мощную толщу меловых отложений. От нижнемелового горизонта верхнеюрский водоносный горизонт отделен пачкой глин. Водоносными породами верхнеюрского комплекса являются пески и песчаники с прослоями глин, алевролитов и углей. Большое содержание глинистых слоев, служащих водоупорами, является причиной значительной разобщенности подземных вод комплекса. На отдельных участках верхнеюрские отложения полностью проморожены. Изолированность водоносных горизонтов отражается в их гидродинамических характеристиках и химическом составе подземных вод.

Водоносные породы комплекса вскрыты скважинами с глубины 380 м. Химический состав подмерзлотных вод гидрокарбонатный натриевый при минерализации от 0.6 до 1.3 г/л, концентрация лития в них колеблется от 0.15 до 0.27 мг/л [5, 6].

Водоносный комплекс среднеюрских пород  $(J_2)$  распространен севернее широты оз. Белое в г. Якутске. Южнее отложения средней юры находятся в многолетнемерзлом состоянии. В литологическом составе пород преобладают песчаники и алевролиты, встречаются глины, глинистые сланцы, алевриты, сланцы. Мощность отложений средней юры быстро нарастает к северу от г. Якутска и достигает 500 м и более.

На водоразделах водоносные породы вскрыты скважинами под толщей многолетнемерзлых пород мощностью 290–470 м [1]. В долине Туймаада среднеюрский водоносный комплекс залегает на глубине 120–250 м (в районе оз. Белое и в пос. Марха соответственно). По химическому составу подземные воды хлоридно-гидрокарбонатные или гидрокарбонатные натриевые при минерализации от 0.9 до 1.6 г/л, концентрация лития в них составляет от 0.28 до 0.48 мг/л [6, 7].

Водоносный комплекс нижнеюрских пород  $(J_1)$  занимает практически всю центральную часть рассматриваемой территории. Он сложен песками, алевролитами, песчаниками, конгломератами, сланцами, местами с прослоями глин и углей. Мощность отложений от первых десятков метров до 500 м и более. Обводненными породами являются главным образом песчаники, конгломераты и пески. Пачки глинистых пород образуют местные водоупоры, которые не имеют выдержанной мощности и регионального распространения. Наиболее изучен этот комплекс в долине Туймаада. Отдельными скважинами он вскрыт на Лено-Амгинском междуречье. На обширной площади Лено-Вилюйского междуречья скважин, вскрывших обводненные отложения нижней юры, практически нет.

На левобережье р. Лены глубина залегания подошвы мерзлой толщи в нижнеюрских отложениях составляет 173—422 м. На Лено-Амгинском междуречье в зоне влияния разломов, контролирующих Суольскую котловину, выявлены участки с аномально низкой мощностью многолетнемерзлых пород, всего 59—122 м (пос. Майя, Сатагай). Несколько другая мерзлотно-гидрогеологическая обстановка складывается в бассейне верхнего и среднего течения р. Татты на Таттинском выступе фундамента. Мощность многолетнемерзлых пород здесь достигает 563 м, а обводненных пород 30—35 м [1].

Анионный состав подземных вод нижнеюрского водоносного комплекса преимущественно хлоридно-гидрокарбонатный или гидрокарбонатный, реже сульфатно-гидрокарбонатный, из катионов стабильно преобладает натрий. Минерализация подземных вод изменяется от 0.7 до 1.9 г/л, при среднем значении 1.3 г/л, содержание лития в них варьируется от 0.07 до 0.84 мг/л при среднем значении 0.31 мг/л [7].

В южной части района исследований с нижнеюрским водоносным комплексом гидравлически связан среднекембрийский ( $\mathfrak{C}_2$ ). Водоносный комплекс среднекембрийских пород распространен на обширной территории от р. Лены до р. Амги. Геокриологическая обстановка здесь довольно сложная, мощность многолетнемерзлых пород колеблется от 10—15 до 400 м и более. Породы комплекса представлены преимущественно карбонатными разностями: известняками, доломитами, мергелями. В нижней части водоносного комплекса известняки глинистые битуминозные, иногда кремнистые, с прослоями аргиллитов. Мощность отложений достигает 400 м и более.

Обводненные породы среднего кембрия вскрыты повсеместно непосредственно под многолетнемерзлой толщей мощностью 185—467 м, за исключением территории севернее Табагинского мыса, где первым подмерзлотным комплексом является нижнеюрский. Вскрытая мощность водоносных среднекембрийских образований изменяется от 25 до 200 м и более.

Подземные воды в отложениях этого комплекса по химическому составу в основном гидрокарбонатно-сульфатные, реже хлоридно-гидрокарбонатные, натриевые с минерализацией 1.1–2.6 г/л, содержание лития в них изменяется от 0.13 до 1.16 мг/л при среднем значении 0.59 мг/л [6]. Распространение гидрокарбонатных вод отмечается на участках уменьшения мощности многолетнемерзлых пород.

В скважинах, эксплуатирующих совместно нижнеюрский и среднекембрийский водоносные комплексы, состав воды сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатный или хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатный натриевый. Здесь преобладают пресные подземные воды, хотя встречаются и слабосолоноватые с минерализацией до  $1.5\,$  г/л. Содержание лития в воде изменяется от  $0.10\,$  до  $0.85\,$  мг/л [5–7].

Водоносный комплекс нижнекембрийских пород ( $\mathfrak{C}_1$ ) развит на юге и юго-западе Центральной Якутии. В северном и восточном направлениях отложения нижнего кембрия постепенно погружаются под среднекембрийские породы, а в центральной части Якутского поднятия они полностью размыты. Водоносный комплекс наиболее изучен вдоль долины р. Лены до широты г. Якутска. Отложения представлены в основном карбонатной толщей известняков, пестроцветных мергелей, реже доломитов. Мощность пород достигает 450 м. Водоносный комплекс залегает под многолетнемерзлыми породами с глубины от 285 м (в районе пос. Качикатцы на низкой надпойменной террасе р. Лены) до 426 м (у оз. Борулах на междуречье рек Лены и Буотомы). Вскрытая мощность обводненных пород составляет 40–70 м. Химический состав подмерзлотных вод данного комплекса преимущественно гидрокарбонатный, реже гидрокарбонатно-хлоридный или гидрокарбонатно-сульфатный, смешанный по катионам. Минерализация подземных вод варьируется от 0.2–0.9 г/л (на участке Борулах-Качикатцы) до 3.5 г/л на участке Табага-Якутск. Концентрация лития в подземных водах нижнекембрийских отложений высокая: от 0.66 до 1.02 мг/л, среднее ее значение составляет около 0.8 мг/л [6, 7].

#### Заключение

Для пресных и слабоминерализованных подмерзлотных вод Центральной Якутии характерно повышенное содержание лития. Так, в подмерзлотных водах, приуроченных к меловым отложениям, концентрация лития достигает 0.3 мг/л. В подмерзлотных водах юрских водоносных комплексов концентрация лития изменяется в широких пределах — от 0.07 до 0.85 мг/л, что превышает предельно допустимую концентрацию для питьевых вод в 2—28 раз. Наиболее обогащены литием подмерзлотные воды кембрийских водоносных комплексов, представленных карбонатными породами. Концентрация лития в этих водах достигает 1 мг/л. Четкой корреляции между концентрацией лития и минерализацией воды, а также отдельными макроэлементами не выявлено. Источниками поступления лития в подмерзлотные воды могут быть горные породы, обогащенные слюдистыми минералами. Последние в процессе гипергенного изменения переходят в глинистые минералы, в результате чего литий получает возможность мигрировать в подземные воды в виде катиона Li<sup>+</sup>. Кроме этого, накоплению лития в подземных водах может способствовать криогенная метаморфизация их химического состава в условиях затрудненного водобмена.

Минимальное содержание лития в подмерзлотных водах отмечается на участках, где существуют гидрогеологические окна. Доказательством этому служат химические анализы воды из водозаборных скважин на отрезке Кангаласский мыс — Намцы. Здесь в районе пересечения р. Лены тектоническим разломом не исключено питание и, соответственно, разбавление подмерзлотных вод поверхностными водами р. Лены. В результате в подмерзлотных водах концентрация лития не превышает пределы допустимых концентраций для питьевых вод.

- 1. Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования / Отв. ред. Н.П. Анисимова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 137 с.
- 2. Хорстман Э.Л. Распределение лития, рубидия и цезия в изверженных и осадочных породах // Геохимия редких элементов. М.: Недра, 1959. С. 9–68.
- 3. Морозов Н.П. Содержание лития и рубидия в морской воде и грунтовых растворах морских осадков // Исследования по теоретической и прикладной химии моря. М.: Наука, 1972. С. 92–102.
- 4. Алексеева Л.П., Алексеев С.В. Геохимия подземных льдов, соленых вод и рассолов Западной Якутии. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2019. 214 с.
- 5. Федорова С.В., Павлова Н.А. Литий в подземных водах южной части Якутского артезианского бассейна // Материалы IX ВПНК «Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России». Якутск: Издательский дом СВФУ, 2019. Т. 2. С. 225–228.
- 6. Федорова С.В. Распределение лития в подмерзлотных водах и возможности их использования для питьевого водоснабжения в Якутии // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 7. С. 17–23. doi: 10.35776/MNP.2020.07.03.
- 7. Fedorova S.V. Use of subpermafrost groundwater resources for drinking water supply in Yakutia // IOP Conference series: Earth and Environmental science. 2020. V. 459, Ch. 4. doi: 10.1088/1755-1315/459/5/052002.

#### О ВОДООБМЕННОЙ РОЛИ КРИОЛИТОЗОНЫ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-308-311

#### Шепелёв В.В.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, sheply@mpi.ysn.ru

**Аннотация.** Акцентируется внимание на важности изучения водообменной роли криолитозоны и исследования ее влияния на формирование ресурсов и режима поверхностных и подземных вод. Рассматривается отдельно водообменная роль деятельного слоя криолитозоны и воздействие ее многолетней динамики на направленности и масштабы водообмена. Кратко охарактеризованы криогенные процессы, повышающие водообменную функцию криолитозоны.

Ключевые слова: водообмен, криолитозона, ресурсы подземных и поверхностных вод.

**Abstract.** The importance of understanding the water exchange role of permafrost, as well as its role in the formation of surface and ground water resources and regime is emphasized. The water exchange role of the active layer of the cryolithozone and the impact of its long-term dynamics on the direction and scale of water exchange are considered separately. Cryogenic processes that increase the water exchange function of the cryolithozone are briefly characterized.

Key words: water exchange, cryolithozone, groundwater and surface water resources.

В криолитозоне, занимающей в настоящее время четверть суши Земли и распространяющейся в некоторых районах до глубины 1.5 км и более, содержится по ориентировочным расчетам около 400 тыс. км<sup>3</sup> подземного льда. Однако криолитозона является не только весьма масштабным по размерам хранилищем льда, но и очень динамичной открытой диссипативной системой. Основной ее особенностью являются фазовые переходы воды, которые во многом обусловливают сложность ее строения, высокую динамичность и специфичность развития различных процессов криогенеза. В данной системе происходят фазовые переходы воды из жидкого состояния в твердое (процессы льдообразования или промерзания), из твердого в жидкое (процессы протаивания), из газообразного в твердое (процессы десублимации или абляции), из твердого в газообразного состояния в жидкое (процессы конденсации).

Водообменная функция криолитозоны связана, прежде всего, с фазовыми переходами воды из жидкого состояния в твердое и обратно, т.е. с процессами промерзания водонасыщенных и протаивания льдонасыщенных горных пород. Ежегодно в ее верхней части происходит сезонный переход подземных льдов в жидкую фазу и обратно в огромных количественных масштабах [1, 4, 6]. Суммарный объем воды, образуемой от таяния подземного льда, аккумулируемого в зимний период в деятельном слое криолитозоны, составляет около  $4\cdot10^{12}$  м<sup>3</sup>, что в 3.3 раза превышает единовременный объем воды всех рек нашей планеты [10]. Значительная часть образуемой при этом влаги поступает на формирование различных видов надмерзлотных вод, которые расходуются на транспирацию и подземное питание рек и озер криолитозоны. Величина надмерзлотного стока в области распространения многолетнемерзлых пород по нашим расчетам равна  $19\cdot10^9$  м<sup>3</sup> /сут, или 220 тыс. м<sup>3</sup>/с.

Таким образом, водообменная функция самого верхнего слоя криолитозоны, обусловленная сезонными фазовыми переходами воды из жидкого состояния в твердое и обратно, весьма значительна. Именно по этой причине правомерно выделять в гидрологическом (климатическом) цикле круговорота природных вод отдельно криолитогенное звено, связанное с сезонными переходами подземных вод, формируемых в деятельном слое криолитозоны, из жидкого состояния в твердое и обратно.

Своеобразна и, безусловно, более масштабна водообменная функция криолитозоны, связанная с многолетней динамикой ее развития под воздействием периодических крупных колебаний климата. Мощность и площадь распространения многолетнемерзлых пород значительно увеличиваются в периоды похолоданий климата (криохроны) и уменьшаются в последующие потепления (термохроны). В Западной и Восточной Сибири, например, только

за последние 800 тыс. лет выделяют около 20 подобных пульсаций криолитозоны (криоциклов) продолжительностью от 2 до 40 тыс. лет и более [7].

Последнее крупное похолодание климата произошло в сартанский криохрон (37–11 тыс. лет назад), который называют главным климатическим минимумом плейстоцена [5]. Пик этого похолодания был около 18 тыс. лет назад, когда многолетнемерзлые породы занимали около 110 млн км² суши Земли, охватывая практически всю Европу, большую часть территорий Азиатского континента и Северной Америки. После этого начался общий тренд на потепление, максимум которого пришелся на время около 7–6 тыс. лет назад (голоценовый климатический оптимум). В период этого термохрона южная граница распространения криолитозоны сместилась в северном направлении на 1300–1500 м, сформировались значительные по площади надмерзлотные водоносные таликовые зоны мощностью до 150–300 м.

Ориентировочный расчет показывает, что за период голоценового термохрона было переведено в жидкую фазу около  $4.5 \cdot 10^{15}$  м<sup>3</sup> подземного льда. Интенсивность поступления воды, образуемой от таяния этого количества льда, в поверхностные и подземные пути ее стока и аккумуляции составляла в среднем порядка 820 км<sup>3</sup> в год. Это сопоставимо с интенсивностью водообмена в таких звеньях геологического цикла круговорота природных вод, как литогенное, метаморфогенное и магматогенное. С учетом данного обстоятельства автором ранее предлагалось выделять отдельно криолитогенное звено в геологическом цикле круговорота природных вод [9, 10].

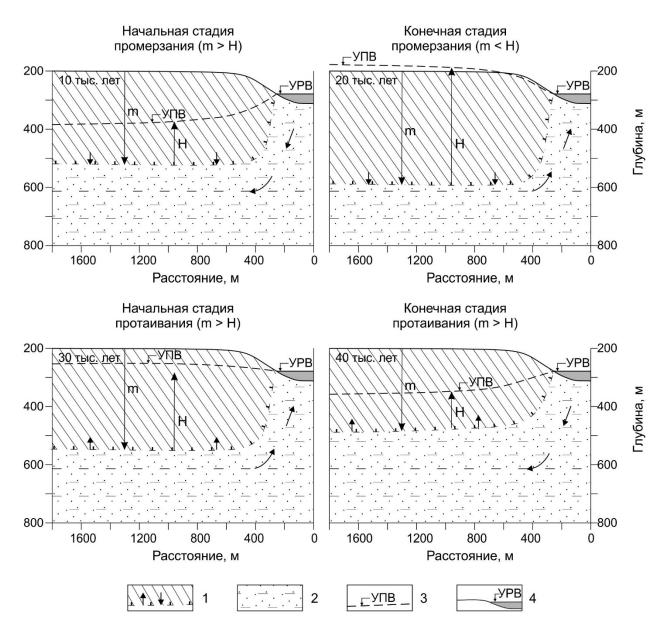
Весьма специфичен водообмен подмерзлотных вод с поверхностными водами при масштабных изменениях климата. В периоды похолоданий промерзание водоносных горных пород вызывает отжатие определенной части подземных вод от фронта межфазовой границы, поскольку объем образующегося в горных породах льда примерно на 9 % больше жидкой фазы воды. Под воздействием подобного так называемого кристаллизационно-компрессионного эффекта значительно повышается гидростатическое давление в промерзающих водоносных горизонтах, что вызывает рост пьезометрических уровней подмерзлотных вод. Амплитуда повышения гидростатического давления в подмерзлотной зоне в периоды похолоданий климата, как показало моделирование, может достигать 32 – 34 МПа [3]. Это, в свою очередь, способствует значительному повышению величины разгрузки подмерзлотных вод по сквозным таликам, существующим под крупными реками и озерами в криолитозоне (рисунок).

В продолжительные периоды потепления климата происходит смещение фазовой границы (мерзлые породы – подземные воды) вверх по разрезу, что сопровождается понижением гидростатического давления в подмерзлотной зоне (кристаллизационновакуумный эффект). Под воздействием этого эффекта формируются значительные по величине депрессии пьезометрического уровня в подмерзлотных водоносных горизонтах и комплексах, что интенсифицирует как горизонтальную фильтрацию подземных вод, так и их инфильтрационное питание за счет поверхностных вод по сквозным таликовым зонам. Величина инфильтрационного питания подмерзлотных вод по сквозным таликам в периоды потепления климата может достигать 40–60 м<sup>3</sup> на 1 км<sup>2</sup> площади таликовой зоны [3].

Таким образом, в продолжительные периоды похолоданий климата происходит не только перевод огромных объемов подземных вод в твердую фазу, но и истощение ресурсов подмерзлотных водоносных горизонтов за счет повышения величины их разгрузки по сквозным таликовым зонам под воздействием кристаллизационно-компрессионного эффекта. В длительные же периоды потепления климата происходит восполнение запасов и ресурсов подмерзлотных вод как за счет таяния подземного льда, так и за счет повышения их инфильтрационного питания по сквозным таликовым зонам. Именно подобная активная водообменная роль последних охраняет их от промерзания даже в период значительных по амплитуде и продолжительных по времени похолоданий климата. При этом изменяется гидрогеологическая роль сквозных таликовых зон. В длительные периоды похолодания климата они являются водовыводящими для подмерзлотных водоносных горизонтов, а в

длительные периоды потепления климата — водопоглощающими для поверхностных водоемов.

Высокая водообменная функция криолитозоны, безусловно, связана с тем, что периодические фазовые переходы подземных вод в твердую фазу и обратно увеличивают трещиноватость и эффективную пористость горных пород, повышая тем самым их фильтрационные свойства. Особенно интенсивно криогенная деструкция горных пород протекает в верхних слоях разреза криолитозоны, где имеют место сезонные переходы жидкой фазы воды в твердую и обратно. При этом широкое развитие морозобойной трещиноватости горных пород способствует формированию своеобразного полигональнолокализованного типа питания и стока надмерзлотных вод деятельного слоя, что значительно усиливает условия их водообмена с поверхностными водами.



Динамика мерзлотно-гидрогеологической обстановки вблизи сквозного подруслового талика в разные климатические периоды. H — величина гидростатического напора подмерзлотных вод; m — мощность многолетнемерзлых пород (минимальная мощность — в момент времени 0 и 40 тыс. лет, максимальная — в период 20 тыс. лет). I — многолетнемерзлые породы и направленность смещения их фазовых границ; 2 — водоносные породы; 3 — пьезометрический уровень подземных вод; 4 — уровень воды в реке.

В средних и нижних частях разреза криолитозоны также отмечается развитие криогенной деструкции горных пород, что приводит к возникновению зон их вторичной трещиноватости (криогенной дезинтеграции). Периодическая пульсация нижней границы многолетнемерзлой толщи и плановых размеров сквозных таликов вызывает формирование на контакте талых и мерзлых горных пород сильнообводненных зон, способствующих усилению водообмена в гидрогеологических структурах криолитозоны и улучшению взаимосвязи подмерзлотных вод с поверхностными водами [2, 8].

Помимо процессов промерзания водонасыщенных и протаивания льдонасыщенных горных пород определенную роль в водообменной функции криолитозоны, безусловно, играют и другие фазовые переходы воды. Однако изучены они в этом отношении недостаточно глубоко и всесторонне. Имеющиеся результаты исследований свидетельствуют о том, что такие фазовые переходы воды, как процессы десублимации (абляции), испарения и конденсации, протекают в условиях криолитозоны достаточно интенсивно. Так, по данным водобалансовых наблюдений, проведенных в Центральной Якутии, в деятельном слое, сложенном разнозернистым песком, в зимний период может аккумулироваться в виде десублимационного льда около 40–60 мм влаги [10]. В подмерзлотной зоне процессы десублимационного льдообразования возможны в тех случаях, когда уровень безнапорных подземных вод находится ниже подошвы многолетнемерзлой толщи. Подобные условия встречаются в некоторых высокогорных гидрогеологических массивах и адмассивах криолитозоны.

Все изложенное указывает на необходимость и важность дальнейшего более углубленного изучения водообменной роли криолитозоны.

Исследования выполнены при частичной поддержке РФФИ (проект 20-05-00670).

- 1. Алексеев В.Р. Вода и лед в криосфере Земли // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: Материалы международной конференции. Иркутск: Изд-во Института географии СО РАН, 2005. С. 4–7
- 2. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 319 с.
- 3. Балобаев В.Т. Гидродинамические процессы формирования подмерзлотных вод // Подземные воды Центральной Якутии и перспективы их использования. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. С. 51–67.
  - 4. Втюрин Б.И. Подземные воды СССР. М.: Наука, 1975. 215 с.
  - 5. Зубаков В.А. Глобальные климатические события плейстоцена. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 280 с.
  - 6. Котляков В.М. Избранные сочинения. Кн. 5. В мире снега и льда. М.: Наука, 2002. 384 с.
- 7. Фотиев С.М. Современные представления об эволюции криогенной области Западной и Восточной Сибири в плейстоцене и голоцене // Криосфера Земли. 2005. Т. IX, № 2. С. 3–22.
- 8. Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты). Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 279 с.
- 9. Шепелев В.В. О схеме круговорота природных вод // Доклады IV Всероссийского гидрологического съезда, секция 3. Ч. II. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2008. С. 72–76.
- 10. Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. 169 с.

### IV. ГИДРОГЕОЛОГИЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ ОБЛАСТЕЙ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-312-315

## ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН НА ПРОМЫШЛЕННЫЕ РАССОЛЫ, НЕФТЬ И ГАЗ В ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТРЕЩИННЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Акчурин Р.Х., Иванишин В.М., Ружич В.В., Ташкевич И.В., Лисицин М.В. Институт земной коры СО РАН, Иркутск, andrey igp@mail.ru

Аннотация. Обсуждаются методические особенности бурения и заканчивания скважин в трещинных природных резервуарах, вмещающих залежи с разным пластовым давлением флюидонапорных систем, от аномально высокого до аномально низкого. Исследования флюидонапорных систем промышленных бромолитиеносных рассолов, месторождений и залежей нефти и газа выполнены авторами на юге Сибирской платформы в период с 1983 по 2019 г. Представлено обобщение главных результатов, в том числе новых технических решений, которые защищены патентами РФ.

**Ключевые слова:** промышленные воды, трещинные природные резервуары, бурение и заканчивание скважин.

**Abstract.** Methodological features of drilling and completing wells in fractured natural reservoirs containing deposits with different reservoir pressures of fluid-pressure systems, from abnormally high to abnormally low, are discussed. Studies of fluid pressure systems of industrial lithium-bromine brines, oil and gas fields and deposits were carried out in the south of the Siberian platform in the period from 1983 to 2019. This report summarizes the main results, including new technical solutions, which are protected by patents of the Russian Federation.

Key words: industrial waters, fractured natural reservoirs, drilling and well completion.

Геологический разрез осадочного чехла Сибирской платформы, по которому бурится глубокая скважина, априори находится в напряженном состоянии. Исследования закономерностей развития обратимых и необратимых изменений, деформаций горных пород в призабойной зоне пласта (ПЗП) скважин и в продуктивном пласте с углеводородным (УВ) или гидроминеральным насыщением крайне важны для решения вопросов корректной оценки: (1) гидродинамических параметров продуктивного пласта-коллектора (проницаемости, водопроводимости, продуктивности по промышленному рассолу, нефти, газоконденсатной смеси, (2) извлекаемых запасов гидроминеральной или УВ-системы, (3) обоснования допустимого диапазона депрессии на систему пласт – залежь (флюидодинамическую систему), (4) проектирования гидроразрыва пласта (ГРП) во всех его модификациях.

Важно учесть горно-геологические условия конкретного природного резервуара, свойства пластовых гидроминеральных или углеводородных систем. Это позволит обосновать технологические подходы к бурению, испытанию на продуктивность (ГДИ) и освоению залежей нефти, газа и металлоносных рассолов в деформированных коллекторах [1–5, 7, 11, 12].

Залежи промышленных рассолов и УВ в терригенных природных резервуарах венда и трещинных массивных резервуарах рифея Сибирской платформы характеризуются аномально низким пластовым давлением флюидов, с градиентом около 0.7–0.8 от гидростатического. Высоконапорные залежи в межсолевых карбонатных трещинных пластах (зонах) мегарезервуаров венда – кембрия содержат предельно насыщенные промышленные рассолы-рапу с концентрацией солей более 600 г/л и плотностью до 1.48 г/см<sup>3</sup>, нередко с газом, что существенно осложняет процесс их вскрытия бурением. Задокументированы дебиты нефти до 1.0 тыс. м<sup>3</sup>/сут, газа до 1 млн м<sup>3</sup>/сут, слабых рассолов до 30 тыс. м<sup>3</sup>/сут, концентрированных рассолов-рапы до 7.5 тыс. м<sup>3</sup>/сут, которые связаны с трещинно-жильным типом коллектора. Значения коэффициента аномальности (К<sub>ан</sub>) флюидной системы карбонатов кембрия более 2.35.

Ранее показано, что для первичного вскрытия трещинных коллекторов диапазон текущих забойных давлений в призабойной зоне пласта (ПЗП) не ограничивается областью депрессии, а имеет волновой характер и находится в диапазоне от состояния репрессии до депрессии относительно пластовых давлений флюидной системы. По сути, такой коллектор характеризуется равновесными условиями пластового давления флюида и горизонтальной составляющей горного давления на стенки фильтрующих трещин ПЗП, фильтрующих как буровой раствор в первичном вскрытии в условиях  $P_{\text{тек}} > P_{\text{пл}}$ , так и флюид из пласта (нефть, газ, промышленные рассолы) в условиях  $P_{\text{тек}} < P_{\text{пл}}$ .

По Б.В. Боревскому, «наиболее очевидной реакцией коллекторов на воздействие приложения внешних сил является их деформация. Обнаружение явления деформации коллекторов и заключенных в них жидкостей и газов послужило толчком к созданию теории упругого режима фильтрации, на которой базируются современные методы оценки эксплуатационных запасов напорных пластах» [2]. флюидов Действительно, лабораторными экспериментами на керне из продуктивного трещинного коллектора рифея Юрубчёно-Тохомского НГКМ установлено [5], что процесс деформации коллектора необратим. На основе данных по керну описывается, что коллектор очень неоднороден. Это крайне осложняет эксплуатацию месторождения. При пористости всего до 1.2 % проницаемость микро- и макротрещин колеблется в пределах от 0.00001 до 3.6534 мкм<sup>2</sup>. Такая неоднородность по проницаемости приводит к большим ограничениям и очень узкому диапазону возможных депрессий в цикле добычи нефти.

Дело в том, что трещинные системы при определенных депрессиях смыкаются. Скелет коллектора испытывает напряжения, приводящие к «схлопыванию» фильтрующих пустотных пространств, а именно трещин. При восстановлении первичных условий (пластовых давлений) проницаемость трещин заметно снижается, в отдельных случаях до 90 %. Таким образом, скелет горной породы релаксирует и уже не может принять прежний исходный вид. Базовый вывод исследователей – при эксплуатации скважин на нефть и газ в условиях деформируемого карбонатного каверново-трещинного коллектора должны быть обозначены нижние предельные значения депрессии. При снижении ниже нижнего уровня будет происходить безвозвратная потеря фильтрационных характеристик коллектора.

В нашем же случае доказано: процесс неупругих деформаций трещинной системы в ПЗП наблюдается уже непосредственно в рабочих циклах бурения и испытания/освоения скважины – при изменении гидравлической программы бурения, причем при минимальных колебаниях текущего забойного давления [7] и более широком диапазоне динамических давлений на забое, от репрессии до депрессии. Тогда процесс бурения скважин по деформируемому коллектору в условиях минимальных градиентов динамического давления (относительно градиента пластового давления флюида на этой глубине) требует новых проектных и практических решений. Для цикла первичного вскрытия бурением нефтяного пласта сложно подобрать гидравлические условия «щадящего» вскрытия, когда перепад давления на пласт минимален или отсутствует. Если давление в залежи будет уменьшаться на большие величины, чем это заложено в расчетной модели, то накопленная добыча нефти снижается на 20–28 % добычи, рассчитанной без учета деформаций. На основе данных бурения авторы настоящего доклада пришли к выводу, который увязан с изложенными положениями [5], подтвердив явление деформации трещин, наблюдаемое как в области депрессии, так и в области репрессии, в процессе бурения [3, 4].

Таким образом, подчеркнем, что экспериментального развития требует именно область исследований деформируемых неустойчивых коллекторов. К неустойчивым следует отнести флюидонасыщенные трещинные коллекторы в равновесном природном состоянии систем механической (коллектор, стенки фильтрующих трещин) и гидравлической (флюид). Бурением это хрупкое равновесие нарушается, ПЗП меняет проницаемость под воздействием импульсных гидравлических колебаний потока промывочной жидкости.

В то же время область перепада давления, где в ПЗП (и в воронке депрессии/репрессии) трещинный коллектор деформируется, — «узкое» место/область на стыке геологии, гидрогеологии, бурения и разработки месторождения флюидов

(промышленные воды, УВ). Это переходная область от нерентабельной скважины к рентабельной. Находя приемлемый технический подход и алгоритмы его реализации в практику бурового цикла по деформируемым пластам-коллекторам на этапе ГРР, мы решаем проблему сохранения естественной или улучшенной проницаемости ПЗП в области перепада давлений, которые приводят к деформации. Тем самым в зону рентабельности возвращаются значительные запасы нефти и газа [5], а область некачественной (искаженной) кривой продуктивности переходит в область качественных результатов [1, 3, 4].

Одно из практических решений сегодня — бурение газонагнетательных скважин для поддержания пластового давления (ППД). Теоретически доказано, что нижний предел, (оптимальная депрессия для добывающих скважин), после которого необходимо вводить систему ППД, составляет 0.3—0.5 МПа [5]. Другое известное решение — ГРП воздействие, когда решается комплекс задач кратного увеличения дебита пласта/скважины по нефти (флюиду), растет рентабельность разработки месторождения. Однако ГРП — это отдельный, самостоятельный цикл работ на нефтегазовой скважине, с привлечением специальных подрядных организаций, техники, специалистов. Цикл ГРП весьма затратный, алгоритмы и технологические решения в нем наработаны и постоянно модифицируются.

Авторы предложили серию новых технических решений для закрепления естественных проницаемых трещин сразу, в процессе первичного вскрытия пласта коллектора бурением применительно к трещинному резервуару. Задача — сохранить проницаемость трещинной системы в области призабойной зоны при воздействии сжимающих напряжений (массива горных пород), возрастающих с формированием воронки депрессии, в первую очередь в призабойной зоне пласта-коллектора при росте депрессии ( $\Delta P$ ) выше критических значений. Такой областью является призабойная зона в радиусе первых метров вокруг скважины, вскрывшей трещинный пласт-коллектор [6].

Все решения опираются на опережающее (до создания депрессии на пласт) закрепление естественных фильтрующих трещин в проницаемой части пласта-коллектора природного резервуара в призабойной зоне и «работают» как для АНПД, так и для АВПД-систем. Закрепления периодически выполняют проппантом по аналогии с технологией ГРП [11] до очистки призабойной зоны от фильтрата бурового раствора. Это позволяет исключить в дальнейшем необратимое смыкание фильтрующих трещин на этапах очистки пласта и испытания (разведочная скважина) или очистки и освоения (эксплуатационная скважина), т. е. скважинной добычи жидкого или газообразного полезного ископаемого при создании первой и последующих депрессий на флюидную систему и продуктивный пласт-коллектор.

Практика показала, что инновационными решениями [8–10, 13] через опережающее призабойной закрепление проницаемых трещин В зоне флюидопроявляющего (нефтегазоносного, рапоносного) пласта-коллектора в открытом (исходном природном) состоянии обеспечивается сохранение естественной проницаемости природных фильтрующих трещин флюидопроявляющего пласта-коллектора с пластовым давлением флюидной системы от аномально низкого (АНПД) до аномально высокого (АВПД). Решение обеспечивает постоянство проницаемости трещинной фильтрационной системы на протяжении циклов очистки призабойной зоны от бурового раствора, получение истинных расчетных гидродинамических параметров по результатам испытания скважины на режимах «методом установившихся отборов» и стабилизацию дебита (продуктивности) при дальнейшей эксплуатации скважины.

- 1. Белонин М.Д., Славин В.И., Чилингар Д.В. Аномально высокие пластовые давления. Происхождение, прогноз, проблемы освоения залежей углеводородов. СПб.: Недра, 2005. 324 с.
- 2. Боревский Л.В. Анализ влияния физических деформаций коллекторов на оценку эксплуатационных запасов подземных вод в глубоких водоносных горизонтах // Методы изучения и оценка ресурсов глубоких подземных вод. М.: Недра, 1986. 479 с.

- 3. Вахромеев А.Г., Иванишин В.М., Сверкунов С.А. Глубокая скважина как стенд гидравлических «online» исследований напряженного состояния горного массива флюидонасыщенных трещинных коллекторов / А.Г. Вахромеев, // Геодинамика и тектонофизика. 2019.№ 10 (3). С. 761–778.
- 4. Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Иванишин В.М., Ильин А.И. Бурение скважин на нефть и газ в сложных горно-геологических условиях: трещинные природные резервуары, АНПД и АВПД пластовых флюидных систем. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. 420 с.
- 5. Кашников Ю.А., Гладышев С.В., Разяпов Р.К. Гидродинамическое моделирование первоочередного участка разработки Юрубчёно-Тохомского месторождения с учетом гидродинамического эффекта смыкания трещин // Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений. 2011. № 4. С. 104—107.
- 6. Мальцев Н.В. Разработка физико-математической модели процесса освоения скважин с помощью УЭЦН. М.: РГУ нефти и газа им. Губкина, 2013. 21 с.
- 7. Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г. Бурение горизонтальных стволов скважин в сложных карбонатных коллекторах с низкими градиентами пластового давления углеводородных систем: учебное пособие. Москва-Вологда: Изд-во Инфра-Инженерия, 2020. 240 с.
- 8. Патент РФ № 2602437 от 11.09.2015. Вахромеев А.Г., Сверкунов С.А., Сираев Р.У., и др. Способ первичного вскрытия бурением горизонтального ствола в трещинном типе нефтегазонасыщенного карбонатного коллектора в условиях аномально-низких пластовых давлений.
- 9. Патент РФ № 2657052 от 21.04.2017г. Опубл. 08.06.2018, Бюл. № 16. Способ испытания и освоения флюидонасыщенного пласта-коллектора трещинного типа (варианты) / В.М. Иванишин, А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов и др./ Заявка № 2017114085 (024647) от 21.04.2017.
- 10. Патент № 2740630 RU. /Заявка № 2020119008/28(032229) от 02.06.2020/ Способ снижения избыточной упругой энергии в глубинных сейсмоопасных сегментах разломов / В.В. Ружич, А.Г. Вахромеев, С.А. Сверкунов и др./ опубл. 18.01.2021, бюл. № 2.
  - 11. Усачев П.М. Гидравлический разрыв пласта. М.: Недра, 1986. 165 с.
- 12. Фукс Б.А. Промысловая характеристика продуктивных пластов юга Сибирской платформы. М.: Недра, 1982. 184 с.
- 13. Экспрессный способ закрепления естественных и искусственных трещин в призабойной зоне продуктивного пласта в процессе первичного вскрытия горизонтальным, наклонным или вертикальным бурением / Заявка № 2020132633/059425 от 01.10.2020./ Р.Р. Асадуллин, В.М. Иванишин, Р.Х. Акчурин и др.

#### МАКРОКОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЕСТЕСТВЕННОМ И НАРУШЕННОМ СОСТОЯНИИ НА ТЕРРИТОРИИ ВАРТОВСКОГО НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РАЙОНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-316-320

Вашурина М.В.<sup>1</sup>, Русакова. Ю.О.<sup>2</sup>, Храмцова А.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

<sup>2</sup>Западно-Сибирский Институт проблем геологии нефти и газа Тюменского индустриального университета, Тюмень, mvashurina@tmnsc.ru

Аннотация. В статье приведен анализ многолетних данных по сухому остатку и основным ионам пресных подземных вод атлым-новомихайловского водоносного горизонта на территории Вартовского нефтегазоносного района. Выполненные исследования позволили сопоставить состав вод в естественном, до интенсивной эксплуатации (с 1965 по 1984 г.), и в нарушенном (с 2004 по 2019 г.) состоянии. В результате было отмечено увеличение сухого остатка и количества проб однородного гидрокарбонатного, с преобладанием кальция и магния состава воды в основном в центральной и восточной части территории исследования и локальное появление нехарактерного для естественных условий гидрокарбонатно-хлоридного калиевонатриевого типа вод. Выявленные пространственно-временные изменения требуют дальнейшего детального изучения для определения степени влияния на формирование состава вод факторов как природного, так и техногенного характера.

Ключевые слова: пресные подземные воды, химический состав, тип воды, показатели, количество.

**Abstract.** The article provides an analysis of long-term data on the dry residue and main ions of fresh groundwater in the atlym-novomiikhaylovsky aquifer in the Vartovsky oil and gas region. The performed studies allowed us to compare the composition of waters in the natural, before intensive operation (from 1965 to 1984), and in the disturbed (from 2004 to 2019) state. As a result, it was noted an increase in the dry residue and the number of samples of a homogeneous hydrocarbonate, with a predominance of calcium and magnesium, water composition mainly in the central and eastern parts of the study area and the local appearance of a bicarbonate-chloride potassium-sodium type of water, uncharacteristic for natural conditions. The revealed spatio-temporal changes require further detailed study to determine the degree of influence on the formation of water composition of factors of both natural and technogenic nature.

**Key words:** fresh groundwater, chemical composition, type of water, parameters, quantity.

#### Введение

Вартовский нефтегазоносный район является наиболее развитым в Среднем Приобье и характеризуется высокой антропогенной деятельностью, связанной с зонами активного промышленного освоения и градостроения, а также с интенсивным недропользованием (нефтедобыча и отбор подземных вод). Добыча нефти ведется здесь с 1969 г. В настоящее время на площади района разрабатываются более тридцати нефтегазовых месторождений. Добыча пресных подземных вод (ППВ) ведется с целью питьевого водоснабжения и технологического обеспечения объектов нефтепромысловой инфраструктуры. Большая часть существующих в настоящее время водозаборов расположена в границах крупных населенных пунктов и разрабатываемых нефтяных месторождений. При многолетней эксплуатации данных водозаборов важной проблемой является оценка современного геохимического состояния ППВ и определение закономерностей его пространственновременных изменений. В данной работе эта проблема освещена на примере сопоставления макрокомпонентного состава вод в естественном или малонарушенном (при освоении) и нарушенном (при интенсивной эксплуатации) состоянии ППВ.

Территория исследований относится к центральной части Вартовского нефтегазоносного района, расположена в восточной части ХМАО-Югры, занимает площадь около 16.45 тыс. км<sup>2</sup>, включая в себя Самотлорское, Аганское, Покачевское, Урьевское, Северо-Покурское и Орехово-Ермаковское месторождения нефти.

Систематическое изучение геолого-гидрогеологических условий территории исследований началось в 60–70-е годы прошлого столетия и было связано с поисками нефти и необходимостью ее хозяйственного освоения. На протяжении многих десятилетий здесь проводились научно-исследовательские работы как регионального, так и локального

характера. При обобщении накопленной информации за этот период изучения подземных вод выполнен полный анализ условий их залегания, распространения, формирования запасов и химического состава [1–4].

В современный период эксплуатации водозаборов ППВ степень гидрогеологической изученности рассматриваемой территории характеризуется высоким уровнем благодаря ретроспективным данным прошлых исследований в области гидрогеологии и результатам ежегодных наблюдений на эксплуатируемых водозаборных участках [5].

Комплекс накопленной информации по результатам геохимического опробования подземных вод за период 1965–2019 гг. послужил исходным материалом для анализа изменения химического состава добываемых ППВ в многолетнем разрезе.

#### Объект и методика исследований

В гидрогеологическом отношении территория расположена в центральной части Западно-Сибирского сложного бассейна пластовых безнапорных и напорных вод и относится к Среднеобскому бассейну подземного стока II порядка. Пресные подземные воды приурочены здесь к сложнопереслаивающейся песчано-глинистой толще континентального генезиса олигоцен-четвертичного возраста, объединяющей водоносные горизонты (ВГ) зоны свободного водообмена [4].

Основные ресурсы и запасы ППВ приурочены к олигоценовым отложениям и сосредоточены в атлым-новомихайловском водоносном горизонте (далее целевой ВГ). Он имеет практически площадное распространение, в пределах исследуемой площади не выходит на поверхность земли, являясь межпластовым напорным, высота напора над кровлей достигает 70 м. Целевые эксплуатируемые интервалы находятся на глубине 70–180 м от поверхности земли, представлены средне- и мелкозернистыми песками. Непосредственной связи с поверхностными водами нет. Сверху горизонт перекрывается глинистыми отложениями четвертичного и олигоценового возраста. Нижним водоупором служат глины тавдинского горизонта, которые, наряду с глинисто-кремнистыми осадками нижнего палеогена и мела, отделяют продуктивные водоносные пласты от залегающих ниже водоносных горизонтов с минерализованными хлоридными натриевыми водами.

Формирование естественных ресурсов целевого ВГ происходит за счет нисходящего движения подземных вод в многопластовой рыхлообломочной системе верхней зоны артезианского бассейна на водораздельных пространствах и восходящего – в крупных эрозионных врезах [2]. Благодаря такой гидродинамике, существующей на исследуемой площади уже длительный период геологической истории, химический облик подземных вод формируется в основном под влиянием литогенных факторов. Плоский равнинный рельеф, плотность гидрографической сети. широкое развитие дренированность территории, превышение осадков испарением, избыточная над обводненность (подтапливаемость) территории формируют определенный химический облик подземных вод. Здесь выделены пресные  $(108 - 971 \text{ мг/дм}^3)$  в основном гидрокарбонатные подземные воды смешанного катионного состава, с нейтральной реакцией среды.

Методика проведенных исследований включала сбор, систематизацию, обработку исходных данных, анализ изменения значений показателей во времени и пространстве, поиск тенденций и закономерностей отмеченных изменений, формулирование выводов по исследованиям, определение дальнейшего направления в изучении ППВ.

Исходными данными для сбора, систематизации и обработки являлись результаты химического анализа более 700 проб воды целевого ВГ, занесенных в государственный кадастр подземных вод, а также в отчетные формы по мониторингу современного состояния подземных вод в исследуемом районе, более чем по 100 точкам наблюдений (водозаборам подземных вод).

Систематизация данных заключалась в разделении их на два периода наблюдений: условно начальный период эксплуатации целевого ВГ (с 1965 по 1984 г.) и современный период (с 2004 по 2019 г.). При этом выделялись сопоставимые точки наблюдений, в

качестве которых использованы идентичные либо пространственно близкие (на расстоянии до 1500 м друг от друга), имеющие близкий интервал опробования целевого ВГ.

Основными показателями для анализа изменения химического состава подземных вод на изучаемой территории выбраны сухой остаток, так как его значение является суммой содержания химических элементов в подземных водах, а также основной состав воды, определенный по преобладающим (более 20 % мг-экв.) анионам и катионам, согласно формуле солевого состава М.Г. Курлова [6]. По анионам это гидрокарбонатный (преобладание в составе воды ионов НСО3), хлоридный (преобладание С1 ионов) и смешанный (>20 % мг-экв как НСО3, так и С1). По катионам это натриево-калиевый тип (преобладание суммы Na и K), кальциево-магниевый (преобладание суммы Са и Мg) и смешанный тип (>20 % мг-экв каждого из перечисленных катионов).

Обработка исходных данных заключалась в определении среднего значения показателя за наблюдаемый период для каждой точки наблюдений.

В результате сбора, систематизации и обработки данных получена представительная выборка по значениям в тридцати трех сопоставимых точках наблюдений в современном и начальном периодах эксплуатации (таблица).

Ι.	Іоказатели	химического	состава	целевого	водоносного	горизонта
----	------------	-------------	---------	----------	-------------	-----------

Период эксплуатации ВГ	Содержание, мг/дм <sup>3</sup>	Кол-во проб	min	max	Среднее значение, мг/дм <sup>3</sup>	Стандартное отклонение, $\Delta$ , мг/дм <sup>3</sup>	Коэффициент вариации, %
Начальный	Сухой	1 33 <u> </u>	109.0	414.5	225.9	71.3	32
Современный	остаток		108.0	971.0	330.5	158.6	48
Начальный	Ca+Mg	Co.l.Mo. 22	18.5	107.1	51.5	24.9	48
Современный	Ca+Ivig	33	21.2	107.1	62.1	24.9	40
Начальный	$N_0 \bot V$	Na+K 33	0	101.6	28.3	25.2	89
Современный	Na⊤K		5.4	274.8	30	48.0	160
Начальный	IICO	22	115.6	536	257.7	87.4	34
Современный	HCO <sub>3</sub>	33	82.6	443.3	283.5	96.0	34
Начальный	Cl	33	1.1	72.2	9.1	13.0	143
Современный	CI	33	0.5	350.7	20.5	61.2	299

Обработка выбранных данных проведена с использованием методов математической статистики, которая включала расчет минимальных, максимальных средних значений показателей, стандартного отклонения, коэффициента вариации, выбор интервалов группирования значений показателей. Наряду с этим использовались специальные гидрогеологические методы обработки исходных данных, заключающиеся в определении типов вод, построении диаграмм и карт временного и площадного распределения показателей. Данный подход к обобщению и систематизации гидрохимической информации является стандартным, он успешно применяется в различных регионах нашей страны и за рубежом [7–10].

#### Результаты исследований и их обсуждение

Анализ значений определяемых показателей в каждом периоде наблюдений (таблица) позволил отметить следующее:

- значения показателей имеют широкий размах (коэффициент вариации 32–299 %);
- наибольший размах минимальных и максимальных значений отмечен для содержания хлора (отличие в 701 раз), суммы натрия и калия (отличие в 51 раз), при этом средние значения по всем анализируемым показателям, за исключением хлора, близки в различные периоды наблюдений;
- среднее значение содержания хлора в современный период по сравнению с первоначальным увеличилось в 2.2 раза.

При сопоставлении частот распределения сухого остатка по сгруппированным интервалам значений (рис.1) отмечено:

- значительное увеличение числа проб с большим значением сухого остатка;
- максимальный интервал значений (> 400) в современном периоде увеличивается в 7 раз, а минимальный интервал значений (< 200) уменьшается в 2.3 раза относительно начального временного периода.

При анализе пространственного изменения значений сухого остатка в современном периоде, по отношению к первоначальному (рис.1), отмечено:

- смещение площади распространения значений показателя в интервале 200–400 мг/дм<sup>3</sup> в направлении с северо-запада на юго-восток, контур распространения при этом принял более ровное (однородное) очертание;
- появление в центральной части исследуемой территории области с большими значениями (более 400 мг/дм<sup>3</sup>) показателя, при этом максимальное значение сухого остатка (971 мг/дм<sup>3</sup>) по-прежнему характеризует воду как пресную.

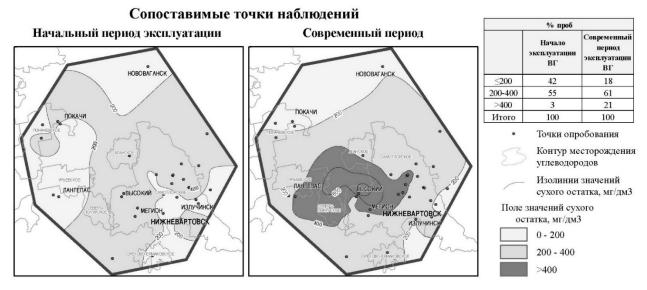


Рис. 1. Схема распределения сухого остатка в пробах воды.

При сопоставлении частоты отнесения проб к принятым типам в современных условиях, по отношению к начальному периоду эксплуатации (рис. 2), отмечено:



Рис. 2. Схема распределения состава вод по преобладающим ионам.

- увеличение количества проб воды с однородным составом (гидрокарбонатные воды с преобладанием кальция и магния) в соотношении 55 %, против 39 %;
- уменьшение количества проб воды смешанного по катионам состава (39 % против 58 %) за счет увеличения частоты проб с большим содержанием кальция и магния;

– увеличение доли вод смешанного по анионному составу на 3 % за счет появления вод, относящихся к гидрокарбонатно-хлоридному типу.

При анализе пространственного изменения типов вод в современном периоде, по отношению к первоначальному периоду (рис. 2), отмечено:

- постоянство основного анионно-катионного состава вод, характерное для северной и северо-восточной части исследуемой территории;
- изменение в сторону увеличения однородного состава вод в центральной и восточной части территории;
- появление в центральной части территории нехарактерного для естественных условий типа вод (гидрокарбонатно-хлоридная калиево-натриевая);
  - изменение типов вод в большинстве (25 из 33) сопоставимых точек наблюдений.

#### Выводы

В результате сопоставления основных составляющих компонентов химического состава пресных подземных вод на период освоения атлым-новомихайловского водоносного горизонта и современной интенсивной эксплуатации в пределах территории Вартовского нефтегазоносного района отмечено их изменение как во времени, так и по площади исследований. Пространственно-временное изменение анализируемых показателей в современный период интенсивной эксплуатации пресных подземных вод характеризуется увеличением в центральной и восточной части территории исследования величины сухого остатка и однородного гидрокарбонатного с преобладанием кальция и магния состава воды, а также появлением в одной из точек опробования нехарактерного для естественных условий гидрокарбонатно-хлоридного калиево-натриевого типа вод.

Наметившаяся тенденция пространственно-временного изменения химического состава пресных подземных вод требует дальнейшего, более детального изучения. При этом важно изучить роль как природных (климатических, геологических и т.д.), так и техногенных факторов, влияющих на химический состав подземных вод, а также установить закономерности его пространственно-временных изменений на изучаемой площади.

- 1. Матусевич В.М. Геохимия подземных вод Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. М.: Недра, 1976. 157 с.
- 2. Смоленцев Ю.К. Основные региональные гидрогеохимические закономерности зоны гипергенеза Западно-Сибирской платформы // Проблемы региональной гидрогеохимии. Л., 1979. С. 87–88.
- 3. Матусевич В.М. Гидрогеологические бассейны Западно-Сибирской равнины // 27 сессия Международного геологического конгресса: Тезисы. М., 1984. Т. 9. Часть 2.
- 4. Смоленцев Ю.К., Кусковский В.С. Особенности формирования подземных вод зоны гипергенеза Западно-Сибирской плиты // Труды Института геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР: выпуск 683. Подземные воды юга Западной Сибири (формирование и проблемы рационального использования). Новосибирск: Наука, 1987. С. 3–65.
- 5. Вашурина М.В., Русакова Ю.О., Храмцова А.Л. Качественная оценка защищенности пресных подземных вод от загрязнений при эксплуатации водозаборов в пределах Среднеобской нефтегазоносной области Западной Сибири // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. №10. С. 5–11.
- 6. ОСТ 41-05-263-86. Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре. М., 1986.
- 7. Комлев А.Е. Анионный состав подземных вод Алтайского края // Известия АлтГУ. 2010. № 3 (67). С. 99–103.
- 8. Льготин В.А., Савичев О.Г., Макушин Ю.В, Камнева О.А. Многолетняя изменчивость химического состава подземных вод Томской области // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 74–79.
- 9. Янкович Е.П., Копылова Ю.Г., Янкович К.С. Распространенность химических элементов в геохимических типах вод Обь-Томского междуречья // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 773.
- 10. Вашурина М.В., Русакова Ю.О., Храмцова А.А. Химический состав пресных подземных вод в естественном и нарушенном состояниях на территории юго-западной части ХМАО Югры // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. М: ВНИИОЭНГ, 2018. № 7. С.44–51.

## СОДЕРЖАНИЕ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗ. КИРИЛЛ-ВЫСЛОР (ХМАО, РОССИЯ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-321-325

Волкова Н.А.<sup>1, 2</sup>, Иванова И.С.<sup>1</sup>, Чуйкина Д.И.<sup>1</sup>, Король И.С.<sup>1</sup>
<sup>1</sup>Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Томск, Volkovana@ipgg.sbras.ru
<sup>2</sup>Институт химии нефти СО РАН, Томск

Аннотация. Изучено содержание полициклических ароматических соединений в водах и донных отложениях оз. Кирилл-Выслор. В воде идентифицировано 9 соединений, преобладающими являются нафталин, бенз[а]пирен и фенантрен. В донных отложениях верхнего горизонта, сложенного песком, обнаружено минимальное содержание ПАУ, представленных в основном фенантреном и нафталином. В образце донных отложений, представленных торфом, идентифицировано наибольшее количество полициклических ароматических соединений, представленных главным образом флуорантеном, бенз[а]пиреном, дибенз[а]антраценом, свидетельствующими о техногенном загрязнении. Выявлено преобладание ПАУ пирогенного происхождения, однако высокое содержание нафталина в воде озера свидетельствует о нефтяном загрязнении. Установлено, что озеро Кирилл-Выслор подвержено антропогенному загрязнению высокого и чрезвычайно высокого уровня.

**Ключевые слова:** Западная Сибирь, поверхностные воды, донные отложения, полициклические ароматические углеводороды, антропогенное загрязнение.

Abstract. The content of polycyclic aromatic compounds in the waters and bottom sediments of Lake Kirill-Vyslor has been studied. Nine compounds have been identified in water, naphthalene, benzo[a]pyrene, and phenanthrene are predominant. In the bottom sediments of the upper sandy horizon, the minimum content of PAHs was found, mainly represented by phenanthrene and naphthalene. In the sample of bottom sediments, represented by peat, the largest amount of polycyclic aromatic compounds was identified, represented mainly by fluoranthene, benzo[a]pyrene, dibenz[a]anthracene, which are indicative of technogenic pollution. The predominance of PAHs of pyrogenic origin was revealed; however, the high content of naphthalene in the lake water indicates oil pollution. It has been established that Lake Kirill-Vyslor is subject to high and extremely high levels of anthropogenic pollution.

**Key words:** Western Siberia, surface waters, bottom sediments, polycyclic aromatic hydrocarbons, anthropogenic pollution.

На территории Западной Сибири сосредоточены огромные запасы пресных вод, экологическое состояние которых не вызывало тревогу до последнего времени. Однако проблемы экологии окружающей среды арктических территорий становятся все более актуальными, поскольку природные факторы и интенсивная хозяйственная деятельность человека приводят к нарушению экосистем северных территорий Западной Сибири.

Более 500 месторождений, эксплуатируемых на территории Западной Сибири, являются источниками значительных поступлений нефтяных загрязнений в природные среды. Установлено, что воды большинства рек на территории нефтедобывающих комплексов загрязнены нефтепродуктами, фенолами [1, 2]. Причинами негативного воздействия на окружающую среду являются не только аварийные ситуации на месторождениях и газонефтепроводах, но и утечка углеводородов за счет миграции и рассеяния при обычной эксплуатации нефтепромысловых объектов; кроме того, возможен подток нефтяных загрязнений из нижележащих толщ [3]. Количество органических поллютантов, поступающих в природу при освоении нефтегазовых ресурсов, приводит к тому, что данный вид загрязнения является особенно актуальным для севера Западной Сибири.

По совокупности показателей токсичности и масштабам вовлечения в хозяйственную деятельность нефть является одним из главных факторов экологического риска для легкоуязвимых природных экосистем севера. Среди токсичных компонентов нефти выделяются полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — высокомолекулярные органические соединения, в структуре которых основным элементом является бензольное кольцо. Содержание данных соединений даже в небольших концентрациях может оказывать огромное влияние на биотические и абиотические компоненты экосистем. Большая часть высокомолекулярных ПАУ (от 4 до 6 конденсированных колец) способствует развитию

мутагенных и тератогенных процессов в живых организмах [4, 5]. Для природных вод среди ПАУ выделяют сильноканцерогенные (бензфлуорантен, бенз(а)пирен), слабоканцерогенные (бензперилен и фениленпирен) и токсичные углеводороды (флуорантен и бензфлуорантен) [6]. Бенз(а)пирен является канцерогеном и мутагеном первого класса опасности и является своего рода маркером техногенного загрязнения природных сред другими полициклическими ароматическими углеводородами. ПАУ обладают высокой миграционной активностью и способны накапливаться в почвах. В водной среде ПАУ, вследствие своей гидрофобности, стремятся к сорбции на поверхности взвешенных частиц, в том числе и органических коллоидов. Присутствие нефти, нефтепродуктов, бензола и других веществ способствует увеличению их растворимости, что, в свою очередь, способствует их накоплению в природных водах [7]. Разложение ПАУ в окружающей среде происходит преимущественно в результате окисления и биодеградации, при этом скорость деструкции этих соединений сравнительно низкая, особенно для высокомолекулярных соединений, и может еще больше снижаться в восстановительных условиях [8]. Среди многочисленных источников поступления ПАУ в природные среды можно выделить как природные, так и антропогенные. К природным источникам можно отнести лесные пожары, извержения вулканов, потоки углеводородов в пределах нефтегазоносных районов, преобразование биомолекул в осадочных породах. Полиароматические углеводороды, поступающие в окружающую среду в результате деятельности человека, образуются преимущественно при работе промышленных предприятий, в двигателях внутреннего сгорания, при работе ТЭЦ и котельных. Также к антропогенным источникам ПАУ могут быть отнесены аварийные разливы нефти [9].

Как правило, состав и структура ПАУ природного и антропогенного происхождения существенно различаются, что позволяет идентифицировать основные источники поступления этих соединений в экосистемы. ПАУ антропогенного происхождения представлены преимущественно пирогенными 4–6-членными соединениями с незамещенной структурой, образующимися в результате горения органического сырья. Природные ПАУ представлены в основном петрогенными алкилированными би- и трициклическими соединениями [8].

В России для разных типов вод установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) лишь для двух соединений. В питьевых водах установлены ПДК на уровне 10 мкг/л для нафталина и 5 нг/л для бензо[а]пирена [10], в воде хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования — 10 мкг/л для нафталина и 10 нг/л для бензо[а]пирена [11], для воды рыбохозяйственного значения нормируется лишь нафталин (4 мкг/л) [12]. Российскими нормативными документами содержание ПАУ в донных отложениях не регламентируется, существуют лишь нормы содержания бензо[а]пирена —  $0.02 \, \text{мг/кг}$  [13].

Проблемами геохимии природных вод коллектив исследователей Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН занимается в течение многих лет. В 2020 г. были проведены экспедиционные работы на территории Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов, где были отобраны пробы природных вод, донных отложений и торфов, в том числе было опробовано озеро Кирилл-Выслор, расположенное в Сургутском районе Ханты-Мансийского автономного округа на территории Холмогорского нефтяного месторождения, относящегося к Надымской нефтегазоносной области северной Сургутского нефтегазоносного района Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. Площадь озера составляет 7.12 км<sup>2</sup>. Основным источником питания озер данной территории являются талые воды и в меньшей степени – атмосферные осадки. Роль грунтовых вод в питании озер незначительна, так как подземное питание наблюдается только в теплый период года.

Целью данной работы было изучение содержания полициклических ароматических углеводородов в воде и донных отложениях оз. Кирилл-Выслор, на территории которого ведется добыча нефти. На основе полученных данных можно будет сделать вывод о природе

источника загрязнения и степени антропогенного воздействия на данный водный объект. Схема отбора проб представлена рисунке.



Схема отбора проб воды и донных отложений на территории оз. Кирилл-Выслор.

Проба воды была отобрана в стеклянную емкость (образец 1032) и законсервирована гексаном, пробы донных отложений отобраны с ненарушенного поверхностного слоя осадков: верхний слой мощностью до 5 см представлен крупнозернистым песком (образец 1032-1), ниже – торфяные отложения (глубина опробования 5–15 см, образец 1032-2). При транспортировке пробы хранились в холодильнике. Пробы донных отложений высушены при комнатной температуре (не более 25 °C), растерты в ступе до гомогенного порошка и просеяны через сито. Определение содержания ПАУ в водном образце проводили в соответствии с действующей методикой, допущенной для целей государственного экологического контроля [14]. Экстракцию ПАУ проводили с использованием гексана. Полученный экстракт упаривали до едва заметных следов гексана, далее доводили объем пробы до 1 мл ацетонитрилом. Экстракцию ПАУ из донных отложений проводили по методике [15]. Навеску пробы (10 г) трижды экстрагировали смесью гексана и ацетонитрила, взятых в соотношении 10:1. Экстракты фильтровали через бумажный фильтр в пробирку для последующего концентрирования на вакуумном концентраторе до объема 0.5 см<sup>3</sup>. Далее полученный экстракт очищали методом тонкослойной хроматографии на оксиде алюминия и доводили объем исследуемого образца до 1 мл ацетонитрилом.

Содержание ПАУ в воде и донных отложениях оз. Кирилл-Выслор определялось в лаборатории физико-химических исследований керна и пластовых флюидов Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Томск) с использованием метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ), на приборе Shimadzu LC-20 с диодноматричным и флуоресцентным детектором. Разделение проводилось на обращенно-фазовой колонке  $150\times4.6$  мм SupelcoSil LC-PAH, фаза  $C_{18}$ , размер частиц 5 мкм. В качестве элюента использовали ацетонитрил (1 сорт) и бидистиллированную воду. Хроматографирование проводили в градиентном режиме: ацетонитрил/вода = (50:50) – (100:0) первые 20 минут, 100 % ацетонитрила с 20-й по 40-ю минуту анализа. Скорость потока растворителя был установлена 1 мл/мин, объем пробы составлял 20 мкл, рабочая температура колонки – 40 °C. Время анализа в выбранных условиях составляло 32 минуты. Спектры снимали в интервале 190–500 нм, для количественного определения сигнал регистрировали на длине волны 254 нм.

В пробах воды и донных отложений были количественно определены в порядке выхода на хроматограммах следующие индивидуальные ПАУ: нафталин (Naph), флуорен (Fl), фенантрен (Phe), флуорантен (Flu), пирен (Py), бенз[а]антрацен (B[a]A), хризен (Chry), бенз[b]флуорантен (B[b]F), бенз[k]флуорантен (B[k]F), бенз[а]пирен (B[a]P),

дибенз[a,h]антрацен (D[a,h]A). Как в воде, так и в донных отложениях основное количество приходится на три- и тетра-ароматические соединения, содержания которых представлены в таблице.

Содержание ПАУ в воде и донных отложениях оз. Кирилл-Выслор

e egeption in the B begon general entertaining est templated Bistorie								
Полициклические ароматические	1032	1032-1	1032-2					
соединения	Содержание, нг/л	Содержані	ие, мкг/кг					
нафталин (Naph)	150	5	39					
флуорен (Fl)	0	0	103					
фенантрен (Phe)	94	149						
флуорантен (Flu)	0	0	1033					
пирен (Ру)	0	2	62					
Бенз[а]антрацен (В[а]А)	58	0	112					
хризен (Chry)	9	0	111					
Бенз[b]флуорантен (B[b]F)	18	0	24					
Бенз[k]флуорантен (B[k]F)	9	0	64					
Бен[а]пирен (В[а]Р)	150	0	260					
Дибенз[a,h]антрацен (D[a,h]A)	94	0	185					
КДА=Сдо/Свод		0.056	3.680					
Соотношения ПАУ								
Флуорен/(флуорен+пирен)	_	_	0.62					
Флуорантен/(флуорантен+пирен)	_	_	0.94					
Бензо[а]антрацен/	0.87	_	0.50					
Бенз[а]пирен/Σ ПАУ	0.26		0.12					

В воде озера было обнаружено девять соединений, содержания которых изменялись от единиц до сотен нг/л. Сумма идентифицированных ПАУ составила 0.582 мкг/л. Среди доминирующих соединений можно выделить нафталин, бенз[а]пирен (по 26 % отн. на сумму всех идентифицированных соединений), содержание которых превышает ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования в 15 раз. Высокое содержание нафталина в водах, возможно, обусловлено его высокой растворимостью в воде (31500 мкг/л). Известно, что нафталин служит индикатором загрязнения нефтью [16]. Фенантрен, источником которого являются выбросы большинства производств и автотранспорта, также обнаружен в водах озера (16 %), расположенного вблизи автотрассы.

Донные отложения играют важную роль в оценке интенсивности антропогенного загрязнения, так как при процессах седиментации и биоседиментации ПАУ аккумулируются в донных осадках, отражая накопленное загрязнение за более длительный период времени.

В донных отложениях верхнего горизонта (1032-1), сложенного песком, обнаружено минимальное содержание ПАУ (38 мкг/кг), представленных в основном фенантреном и отложений, нафталином. образце донных представленных торфом (1032-2),идентифицировано наибольшее количество полициклических ароматических соединений. Суммарное содержание 11 соединений ПАУ составляют 2142 мкг/кг. Анализ концентраций ПАУ свидетельствует о доминировании флуорантена (48 % отн.), бенз[а]пирена (12 % отн.), дибенз[а]антрацена (9 % отн.). Высокое содержание флуорантена свидетельствует о техногенном загрязнении донных отложений. Более низкой долей содержания в смеси ПАУ характеризуется фенантрен – соединение преимущественно природного генезиса (7 % отн.). Такое соотношение ПАУ указывает на приоритет техногенных источников поступления ПАУ в водный объект и, соответственно, его донные отложения. Концентрация бенз[а]пирена в донных отложениях достигает 260 мкг/кг и превышает ПДК в 13 раз (0.02 мг/кг). Также определены высокие значения отношения бенз[а]пирена к сумме ПАУ в воде и донных отложениях [19].

Соотношения ПАУ, используемые для установления их источников [16–18], приведены в таблице. Для исследованных образцов все соотношения ПАУ находятся в пределах одного характерного диапазона значений, определяющего преимущественно пирогенное происхождение ПАУ, однако высокие концентрации нафталина и отсутствие пирена в водах указывают на присутствие нефтяного загрязнения. На высокую степень загрязнения также указывают рассчитанный коэффициент донной аккумуляции (КДА), представленный в таблице [20]. Принято считать, что чем больше значение КДА, тем более сильному антропогенному воздействию подвергается водный объект, что подтверждается полученными значениями. По рассчитанным соотношениям установлено, что основными источниками антропогенного воздействия являются выбросы автотранспорта, а также пирогенные ПАУ, образовавшиеся в результате горения дизельного топлива и при сжигании травы, угля и древесины, свидетельствующие о происходивших ранее пожарах на данной территории, но при проведении исследований выявлена необходимость расширения стандартных образцов замещенных ПАУ для библиотеки данных.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 20-77-10084, аналитические работы выполнены за счет средств гранта Президента № МК-160.2020.5.

- 1. Хорошавин В.Ю., Моисеенко Т.И. Вынос нефтяных углеводородов реками с территорий нефтегазодобывающих районов севера Западной Сибири // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 5. С. 518–529.
- 2. Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Ященко И.Г., Ельчанинова Е.А. Экологическое состояние водных объектов на территории нефтедобывающих комплексов Среднего Приобья // Нефтехимия. 2017. Т. 57. № 3. С. 340–345.
- 3. Оборин, А.А., Хмурчик В.Т., Иларионов С.А., Макарова М.Ю., Назаров А.В. Нефтезагрязненные биоценозы. Пермь: УрО РАН, Перм. гос. ун-т, Перм. Гос. техн. ун-т, 2008. 511с.
- 4. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. Lyon, France, 2010. Vol. 92. 853 p.
  - 5. Шабад Л.М. О циркуляции канцерогенов в окружающей среде. М.: Медицина, 1973. 300 с.
  - 6. Экспериментальная водная токсикология / Под ред. Андрушайтиса Г.П. Рига: Зинатне, 1972. 171 с.
  - 7. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 375 с.
- 8. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195–1209.
- 9. Khalikov I.S. Identification of sources of environmental pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons on the basis of their molar rations // Russian Journal of General Chemistry. 2018. Vol. 88, No. 13. P. 2871–2878.
- 10. СанПин 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству водь централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества, 2001. 204 с.
- 11. ГН 2.1.5.1315-03. Предельнодопустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурнобытового водопользования, 2003. 152 с.
- 12. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: приказ Минсельхоза РФ от 13.12.2016 г. № 552.
- 13. ГН 2.1.7.2041-06. 2.1.7. Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы, 2006. 16 с.
- 14. ПНД Ф 14.1:2:4.70-96. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовых концентраций полициклических ароматических углеводородов в питьевых, природных и сточных водах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии, 1996.
- 15. ФР.1.31.2007.03548. Методика выполнения измерений массовой доли полициклических ароматических углеводородов в пробах почв и донных отложений пресных и морских водных объектов.
  - 16. Neff J.M. Bioaccumulation in Marine Organisms. Elsevier Science, 2002. 468 p.
- 17. Pikkarainen A.-L. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Baltic Sea sediment // Polycyclic Aromatic Compounds. 2004. Vol. 24. P. 667–679.
- 18. Хаустов А.П., Редин М.М. Полициклические ароматические углеводороды как геохимические маркеры нефтяного загрязнения окружающей среды // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 4 (36). С. 92–96.
- 19. Опекунов А.Ю. Экологическая седиментология. Учебное пособие. СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2012. 224 с.
- 20. Никаноров А.М., Страдомская А.Г. Хроническое загрязнение пресноводных объектов по данным о накоплении пестицидов, нефтепродуктов и других токсичных веществ в донных отложениях // Водные ресурсы. 2007. Т.34, №3, С. 337–344.

# БАЙКАЛЬСКАЯ РИФТОВАЯ ЗОНА – ИСТОЧНИК ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ УЛЬТРАПРЕСНЫХ ВОД И УГЛЕВОДОРОДОВ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-326-330

Диденков Ю.Н. $^1$ , Бычинский В.А. $^2$ , Хаустов В.В. $^3$ , Мартынова М.А. $^4$ , Черенева В.А. $^5$ , Проскурякова З.В. $^6$ , Чеснокова М.С. $^7$ 

<sup>1</sup>Байкальский центр исследований глубинного источника пресных вод, Иркутск <sup>2</sup>Институт геохимии СО РАН, Иркутск

<sup>3</sup>Белгородский государственный университет, Белгород <sup>4</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург <sup>5</sup>ООО «Иркутская нефтяная компания», Иркутск, vchereneva@list.ru <sup>6</sup>АО «РУСБУРМАШ», Иркутск

<sup>7</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

**Аннотация.** По результатам структурно-гидрогеологического анализа и термодинамического моделирования обосновывается существование в рифтовых геодинамических условиях источника возобновляемых ультрапресных вод и углеводородов. Основная выявленная закономерность позволяет сделать вывод о том, что наиболее необходимые человечеству природные ресурсы обязаны своим происхождением одним и тем же геологическим процессам, сопровождающим современную дегазацию планеты.

**Ключевые слова:** структурно-гидрогеологический анализ, моделирование, рифтогенез, ультрапресные воды, углеводороды.

**Abstract.** According to the results of structural and hydrogeological analysis and thermodynamic modeling, the existence of a source of renewable ultra-presal water and hydrocarbons in riftal geodynamic conditions is substantiated. The basic pattern revealed leads to the conclusion that the natural resources most needed by mankind owe their origin to the same geological processes that accompany the modern degassing of the planet.

Key words: structural and hydrogeological analysis, modeling, riftogenesis, ultrafine waters, hydrocarbons.

По степени востребованности вода и углеводороды являются наиболее потребляемыми природными ресурсами. В то же время результативное проведение геологоразведочных работ на пресные подземные воды, а также нефть и газ нуждается в коренной смене взглядов на их происхождение и локализацию.

Современный период характеризуется активной научной деятельностью по смене органической парадигмы нефтегазовой геологии в нашей стране на теорию неорганического происхождения нефти, заложенную великими российскими и советскими учеными: Д.И. Менделеевым, Н.А. Кудрявцевым, Б.В. Порфирьевым, П.Н. Кропоткиным и их последователями. Сегодня формулируется современное звучание теории глубинного абиогенно-мантийного происхождения нефти и газа, а в отношении гидрогенных систем — обоснование существования источника ультрапресных вод в рифтовых геодинамических условиях. Таким образом, два главных природных ресурса обязаны своим происхождением одному глобальному геологическому процессу — дегазации Земли.

Байкальский регион в общепланетарном масштабе обладает уникально пресноводной гидросферой, включая ее центральное звено — озеро Байкал. Запасы пресной воды только в озере составляют 19 % мировых и 90 % российских. В то же время в число уникальных характеристик озера входят природные выходы нефти и газа в шельфовой зоне, а также открытия все новых и новых районов присутствия в донных отложениях газовых гидратов. Основные очаги проявления углеводородов — высачивания нефти на мысе Горевой Утес и мысе Толстый; газовый сип на Посольской банке. Исследования Лимнологического института СО РАН показали, что здесь по локализованным каналам разгружаются и глубинные воды, значительно отличающиеся по составу от поровых вод вмещающего осадка в том же интервале разреза. Разгрузка глубинных вод осуществляется как совместно с углеводородами, так и отдельно по зонам активных разломов фундамента впадин и их горного обрамления («плечей» рифта). Приуроченность региона к одноименной рифтовой зоне обусловливает исследование особенностей формирования уникальных гидрогенных и углеводородных систем с позиций дегазационной теории Земли и флюидной геодинамики, являющихся ведущими процессами, объединяемыми понятием рифтогенез.

Байкальская рифтовая зона занимает протяженный (более 2500 км) S-образный участок на востоке Евразийского континента от Северной Монголии до отрогов Алданского щита и Станового хребта (Россия). В геоморфологическом отношении это система чередующихся впадин и хребтов, в тектоническом — подвижный пояс земной коры, начавший свое развитие в архее — протерозое и продолжающий его в настоящее время.

Выполняемые исследования базируются на результатах структурногидрогеологического анализа и имитационного компьютерного термодинамического моделирования процессов образования и эволюции ювенильных вод и углеводородов в условиях Байкальского рифтогенеза.

Большой фактический материал свидетельствует о том, что глубоким разломам в рифтовых зонах свойственны низкоминерализованные воды. Современным рифтовым структурам и их палеоаналогам (рифты Байкальский, Момский, Западно-Сибирской плиты, срединно-океанических хребтов) свойственны инверсионные гидрогеохимические разрезы. В частности, это отчетливо прослеживается по глубоким скважинам в пределах Усть-Селенгинской впадины Байкальского рифта, где минерализация подземных вод может снижаться до 0.13 г/дм<sup>3</sup> на глубине более 1750 м, а содержание водорода в газовой фазе достигать – 100%. Кроме того, установлено, что к рифтогенным системам фундамента Западно-Сибирской плиты (Обь-Пуровская и Уренгой-Тазовская) приурочены как зоны опреснения подземной гидросферы, так и располагающиеся в осадочном чехле крупнейшие газовые месторождения. Современные гидротермы рифтов (Исландия, Байкальский рифт, Восточно-Африканская рифтовая система, рифтовая зона Фэнвэй и др.), в отличие от гидротерм зон субдукции, также пресноводны; значения изотопного соотношения гелия достигают  $\sim 9 \cdot 10^{-6}$ . Не согласован и солевой баланс вод оз. Байкал. Величина минерализации воды озера (0.096 г/дм<sup>3</sup>) ниже средней минерализации впадающих в него рек (0.117 г/дм<sup>3</sup>). Объем ультрапресного ювенильного питания оценен в 17.5 км<sup>3</sup>/год, что соответствует примерно 30 % от общего стока из озера через Ангару [1].

Эти факты не укладываются в схему образования пресной гидросферы только за счет атмосферных осадков. В проводимых исследованиях обосновывается существование единого глубинного источника как опреснения, так и образования углеводородов.

Благодаря работам многих поколений ученых в нефтегазовой геологии в настоящее время сформировались две самостоятельные, взаимоисключающие концепции происхождения нефти и газа. Согласно органической концепции, нефть и газ образуются из органических веществ (ОВ) в течение длительного геологического времени (от десятков до сотен миллионов лет) в условиях воздействия повышенных температур, давлений и концентраций ОВ. Неорганическая концепция утверждает, что углеводороды синтезируются из неорганических веществ (карбонатов, СО2 и других углеродосодержащих веществ) на больших глубинах в мантии при температуре выше 1000 °С и давлении в десятки килобар. Учитывая, что основные реакции синтеза воды в этих условиях протекают с одновременным образованием метана и воды:

$$3H_2 + CO \rightarrow H_2O + CH_4$$
 или  $4H_2 + CO_2 \rightarrow 2H_2O + CH_4$ ,

исследователи формулируют вывод о сопряженности процессов метано- и океанообразования, а также образования гидросферы и углеводородов в целом [2].

Однако остаются вопросы, которым, на наш взгляд, несмотря на их весьма существенное значение, не уделяется должное внимание. Главные из них – каковы состав и минерализация формирующейся воды.

При рифтогенезе — классической обстановке генерации ювенильных вод — вместе с водой в состав «первичного водного флюида» входят такие газы, как  $CO_2$ , CO,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ , соединения серы. Растворяясь в воде в соответствии с термобарическими условиями недр, они определяют ее первичный анионный состав, причем особая роль в этом процессе принадлежит  $CO_2$ . В результате взаимодействия воды с углекислотой в ней появляются ионы  $HCO_3^-$  и  $CO_3^2$ , происходит смещение pH в область кислых значений, и, с учетом очень высокой температуры, вода становится агрессивной по отношению к вмещающей

геологической среде. Эта горячая, насыщенная агрессивной углекислотой вода вступает во взаимодействие с горными породами, которые, как правило, в рифтовых структурах представлены основными и ультраосновными группами. За счет разложения алюмосиликатов и постепенного накопления ионов  $Na^+$  (и  $K^+$ ):

$$NaAlSi_3O_8 + H_2O + CO_2 \rightarrow HAlSi_3O_8 + Na^+ + HCO_3^-$$

(поступлению в воду кальция и магния препятствует низкая растворимость их карбонатных соединений) вода приобретает нейтральную или щелочную реакцию, и существенную роль в ее составе начинают играть карбонаты (гидрокарбонаты) натрия (калия). В то же время горячие воды, недонасыщенные солями кальция, оказываются благоприятной средой для миграции фтора и кремния.

Физико-химическое моделирование эволюции флюидной системы было проведено по модели проточного реактора, имитирующей охлаждение (подъем) эндогенного флюида по следующей схеме расчетов. Выбран состав первичного флюида, соответствующий составу газово-жидких включений в мантийных породах. В ходе моделирования рассчитывается ряд равновесных состояний системы, представленной мантийными породами и восходящим флюидом в условиях понижающихся РТ-значений. Снижение температуры и давления происходит согласно геобаротерме.

Модель представлена последовательно связанными между собой десятью резервуарами (рис. 1).

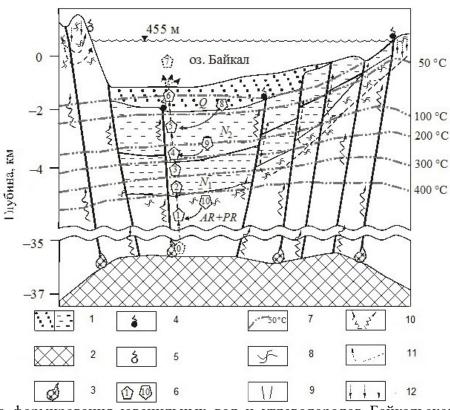


Рис. 1. Схема формирования ювенильных вод и углеводородов Байкальского рифта. Q — осадки четвертичного возраста;  $N_2$  — грубообломочная формация верхнего неогена;  $N_1$  — тонкообломочная формация нижнего неогена; AR+PR — магматические и метаморфические образования архейско-протерозойского возраста. I — кайнозойские отложения; 2 — верхняя мантия; 3 — основные и ультраосновные интрузии; 4 — современные гидротермы; 5 — естественные выходы холодных вод; 6 — резервуары термодинамической модели; 7 — изотермы; 8 — трещиноватость пород; 9 — разрывные нарушения; 10 — направление движения мантийного флюида; 11 — направление движения метеорных вод; 12 — атмосферное питание.

Эндогенный флюид из корневой зоны по трещинному флюидоканалу проникает в вышележащие резервуары, взаимодействует с ксенолитами ультраосновных пород и андезитами (1-й резервуар), затем поступает в зону кайнозойских осадков Байкальской впадины (со 2-го по 6-й резервуары), а затем — в зону разгрузки (7-й резервуар), представленную пресноводным Байкалом. Модель предусматривает возможность смешения глубинного флюида с водой и флюидом метеорного происхождения (резервуары 8, 9, 10). Резервуары отличаются друг от друга РТ-условиями и степенью протекания реакций, то есть соотношениями восходящий флюид — порода. Необходимая термодинамическая информация взята из встроенных в программный комплекс «Селектор» баз термодинамических данных.

Результаты моделирования образования ювенильных вод и углеводородов в зависимости от исходного состава флюида и содержания кислорода приведены на рисунке 2.

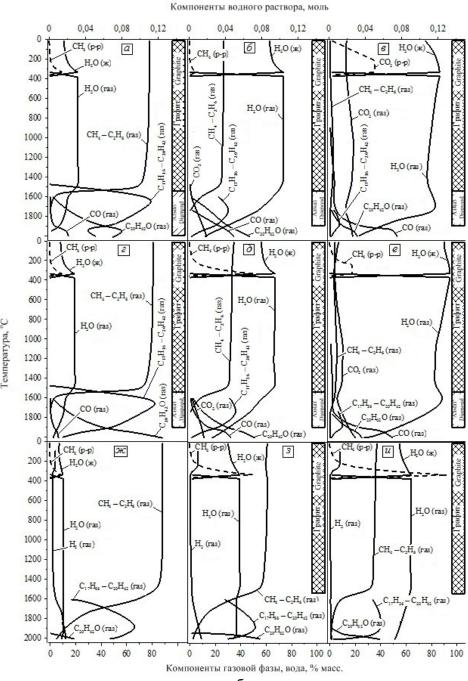


Рис. 2. Результаты моделирования процессов образования ювенильных вод и углеводородов из мантийного флюида в зависимости от исходного состава. a,  $\delta$ , e – H:C = 1.8; e, e, e – H:C = 2.1; e, e, e – H:C = 4.5. Содержание кислорода: e, e, e – 0.1 моль; e, e, e, e – 0.5 моль; e, e, e, e – 1 моль.

Заданы три состава первичных флюидов по отношениям H:C (1.8; 2.1 и 4.5), отвечающим составам разных нефтей и газов. Особенности эволюции каждого из составов рассматривались в зависимости от содержания кислорода во флюиде. Были приняты следующие отношения С к O - 1:0.1, 1:0.5, 1:1, отражающие наиболее вероятные вариации состава флюида по кислороду. РТ-условия соответствовали значениям геобаротерм.

Имитационным моделированием показано, что восходящий поток, имеющий более низкую минерализацию, способен разбавлять воды оз. Байкал, обогащать растворенными газами — азотом, водородом и метаном [1, 3], а также обусловливать нефте- и газопроявления в суходольных рифтовых впадинах и их горном обрамлении.

Теоретические вопросы состава и форм нахождения эндогенного флюида системы C-H-N-O-S, а также термодинамическое моделирование его эволюции в РТ-условиях верхней мантии детально рассмотрены в работах В.С. Зубкова [4].

Результаты исследований позволяют выделить две равноправные ветви глубинной дегазации Земли. Первая — углеводородная, сопровождается накоплением углеродистых образований, формированием месторождений нефти и газа. Со второй, водно-углекислой ветвью, связано накопление газогидратов и образование ультрапресных ювенильных вод [5].

Материалы выполняемых исследований свидетельствуют о том, что оба природных ресурса, в которых наиболее нуждается человечество, – пресная вода и углеводороды, – рождаются в результате одних и тех же геологических процессов, в одних и тех же геодинамических условиях и геологических структурах. Оба эти вещества возобновляемы, но потребление этих ресурсов должно осуществляться на основе гидросферного базиса, исключающего истощение и загрязнение природных вод, с осознанием их экзо- и эндогенного генетического облика.

- 1. Диденков Ю.Н., Мартынова М.А., Пшенникова Н.А. О возможном участии ювенильных вод в питании озера Байкал // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. С. 67-70.
- 2. Румянцев В.Н. Водород и углерод в ядре Земли (к проблеме абиогенного синтеза углеводородов в глубинных условиях) // VI Кудрявцевские чтения Всероссийская конференция по глубинному генезису нефти и газа. М. 2018. С. 321–325.
- 3. Диденков Ю.Н., Чудненко К.В., Бычинский В.А. Эндогенный флюид как возможный источник пресных вод в рифтовых геодинамических условиях // Дегазация Земли: геофлюиды, нефть и газ, парагенезы в системе горючих ископаемых (Материалы междун. конф., Москва, 30 мая 1 июня 2006 г.). М.: ГЕОС, 2006. С. 97–100.
- 4. Зубков В.С. К вопросу о составе и формах нахождения флюида системы C-H-N-O-S в РТ-условиях верхней мантии // Геохимия. 2001. № 2. С. 131-145.
- 5. Диденков Ю.Н., Бычинский В.А., Ломоносов И.С. О возможности существования эндогенного источника пресных вод в рифтовых геодинамических условиях // Геология и геофизика. 2006. Т.47, № 10. Новосибирск: Гео, 2006. С. 1114–1118.

# КОМПЛЕКСНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОРОВЫХ ВОД ПОРОД БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ НИЖНЕВАРТОВСКОГО СВОДА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-331-335

Казак Е.С.<sup>1</sup>, Казак А.В.<sup>2</sup>, Харитонова Н.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Kanigu@mail.ru <sup>2</sup> Сколковский институт науки и технологий, Москва

Аннотация. В статье представлен комплексный подход к изучению поровых вод слабопроницаемых отложений с изначально низкой влажностью (менее 1 мас. %). В результате его применения для целевой коллекции образцов керна баженовской свиты нижневартовского свода Западной Сибири удалось получить новые данные о количественном содержании свободной, физически и химически связанной воды, а также её химическом и изотопном составе. Полученные результаты могут быть использованы для геофизической интерпретации каротажных данных и оценки запасов углеводородов баженовской свиты.

Ключевые слова: поровые воды, баженовская свита, изотопы, связанная вода, водосодержание.

**Abstract.** The paper presents a new integrated solution for the formation water content and composition study in shale reservoirs with initial low water content (<1 wt.%). We reliably determined the free, loosely clay-bound water and chemically bound water content, pore water salinity and origin for the target rock samples of Bazhenov formation in the Nizhnevartovsk arch of Western Siberia. The results fill the knowledge gaps in the petrophysical interpretation of well logs and general reservoir characterization and reserve estimation.

*Key words:* pore water, bazhenov formation, isotopes, bond water, water content.

Баженовская свита  $J_{3v}$  (БС) рассматривается как основная материнская толща для формирования залежей нефти Западной Сибири, а в настоящее время — как главный в стране объект для получения так называемых сланцевых нефти и газа. При этом за весь период поиска, разведки и разработки пород БС (более 60 лет) нигде в скважинах не была встречена водонасыщенная или водонефтяная зона пласта. До начала данных исследований большинство (75-80 %) образцов пород БС было принято считать гидрофобными и специально разработанной эффективной методики оценки содержания и состава поровых водосодержания проводилась было. Оценка традиционными преимущественно методом Закса [1, 2], что не позволяло разделить свободную и связанную воду, а и по известным ограничениям метода достоверно и надежно оценить значение остаточного водосодержания. До начала данных исследований попытка оценить минерализацию пластовой воды была предпринята в работе [2] расчетным методом, другие исследования по этой проблеме не проводились. Таким образом, вопрос получения надежных и достоверных данных по количеству и составу пластовой воды пород БС оставался открытым, нерешенным и крайне актуальным.

Породы БС представляют собой слабопроницаемые отложения с нанопористостью (по газу 3–6 %) и проницаемостью (менее 1 мД) [3], с изначально низким (менее 1–5 мас. %) водосодержанием и вмещают в своем поровом пространстве не только воду, но и углеводороды. С учетом этого для определения в таких породах содержания различных видов воды, оценки ее минерализации, состава и происхождения, измерения емкости катионного обмена и состава обменных катионов нами была предложена специальная комплексная методика, основанная на совместной интерпретации результатов прямых и косвенных методов анализа.

### Материалы и методы исследования

Исследования проводились на целевой коллекции образцов керна слабопроницаемых сланцевых пород (21 образец) из трех скважин различных месторождений БС Нижневартовского свода Западной Сибири. Все исследования были выполнены на изолированных (герметизированных) от воздействия окружающей среды фрагментах полноразмерного керна (Ø 100 мм) (рис. 1). Герметизация осуществлялась путем оборачивания исходного образца в пищевую пленку, фольгу, а затем в марлю и погружением в расплавленный парафин (минимум три раза). Для исключения влияния бурового раствора на результаты определений образцы отбирались из центральной части керна (рис. 1).

Комплексная методика включала в себя ряд прямых и косвенных лабораторных методов. Для определения различных типов воды использовался прямой метод испарения (ИМ) с изотопным анализом ( $\delta^{18}$ О и  $\delta$ D) выделенной воды и термогравиметрический анализ с ИК-Фурье спектроскопией. ИМ был специально разработан для слабопроницаемых сланцевых пород с изначально низким водосодержанием (<5 мас. %) и позволяет быстро и точно определять содержание как свободной, так и физически связанной воды, а также содержание остаточной поровой воды в небольшом образце породы (25-70 г) с ошибкой не более 6.8 отн. % [4]. Термогравиметрический анализ с ИК-Фурье спектроскопией был использован для оценки содержания химически связанной воды образцов пород БС. Модифицированный метод водных вытяжки из неэкстрагированных образцов БС обеспечивает нижнюю границу минерализации поровой воды как NaCl (на основании содержания хлора и натрия в растворах водной вытяжек) [5]. Модифицированный метод спиртового хлорида аммония позволяет измерить емкость катионного обмена (ЕКО) и получить состав обменных катионов для экстрагированных образцов БС даже при содержании карбонатных минералов [6]. Вспомогательные лабораторные методы включали пиролиз Rock-Eval ДЛЯ определения содержания органического вещества, рентгеноструктурный анализ (XRD) для оценки минерального состава отложений.

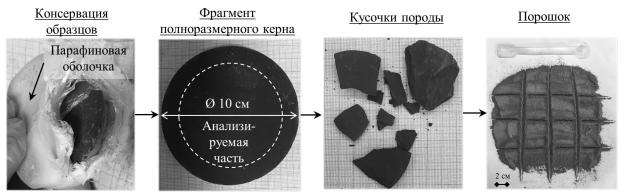


Рис. 1. Консервация и подготовка образцов к исследованиям.

Выбор как прямого, так и косвенного метода предложенной комплексной методики был основан на серии поверочных экспериментов на образцах БС репрезентативной целевой коллекции с верификацией и оценкой точности получаемых результатов, что позволяет доверять полученным данным исследования. Следует отметить, что получение кондиционных данных невозможно без правильного отбора, консервации и подготовки образцов к испытаниям.

### Результаты исследования

Типизация целевой коллекции образцов пород БС выполнялась по данным XRD. Валовый минеральный состав образцов пород БС целевой коллекции представлен (в порядке убывания средней массовой доли): минералами кремнистой группы — 16–86 мас. %; глинистыми минералами — 5–45 мас. %; кальцитом — до 67 мас. %; пиритом — до 26 мас. %; доломитом — до 6 мас. %; апатитом — до 7 мас. % [4]. В целом установлено, что целевая коллекция образцов пород БС с учетом погрешности метода РСА является однородной за исключением нескольких образцов.

По данным геохимических исследований образцы целевой коллекции имеют высокое содержание органического углерода (ТОС) — до 28 мас. %; пониженные значения пика  $S_1$  – 15 мг УВ / г породы и суммарно до относительно высокие значения пика S<sub>2</sub> -230 мг УВ / г породы Породы обладают высоким «превосходным» [4]. нефтегенерационным потенциалом: органическое вещество II типа; стадия катагенетической преобразованности органического вещества — МК 1 (начало нефтяного окна) с температурой T<sub>max</sub> в диапазоне 435-438 °C; степень преобразованности органического вещества низкая. Результаты пиролиза согласуются с результатами, полученными ранее другими авторами [7, 8].

По данным метода испарения содержание остаточной воды составило 0.28—4.27 мас.% (или 2.84—52.43 об. %) при содержании свободной 0.04—2.53 мас. % (рис. 2). Измеренные значения остаточного водосодержания превышают значения для Салмановского месторождения БС по данным метода Закс [1, 2], но не выходят за диапазон значений, характерных для газовых и горючих сланцев Польши, Чешской Республики, Эстонии, США и пр. [9—11]. Получается, что породы БС на сегодняшний день практически полностью уплотнены и представляют собой региональный водоупор, из которого отжато >95 % воды.

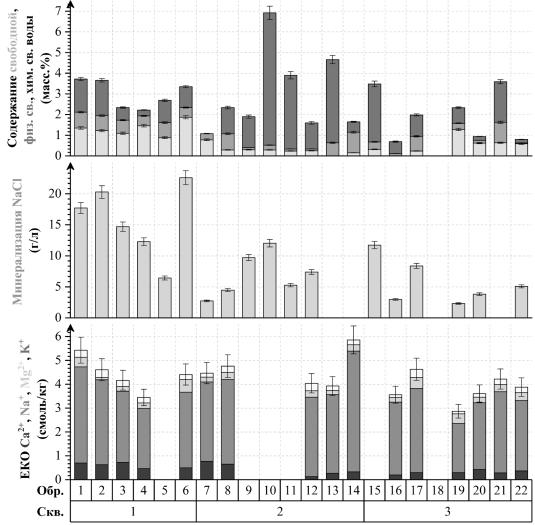


Рис. 2. Комплексная характеристика поровых вод пород баженовской свиты.

Для рассматриваемой коллекции образцов БС установлена прямая зависимость содержания физически связанной воды от количества глинистых минералов. Помимо этого, наблюдается общая тенденция увеличения содержания остаточной воды с ростом количества глинистых минералов и ее снижение с увеличением количества ОВ (параметр  $S_2$  по пиролизу). В целом полученные результаты укладываются в традиционную концепцию смачиваемости сланцевых пород [12], предполагающую, что в неорганических порах присутствует преимущественно вода, в поровом пространстве твердого ОВ содержатся углеводороды.

Результаты изотопного анализа поровой воды показали, что для вод, полученных методом испарения, значения  $\delta^2 H_{VSMOW}$  находятся в диапазоне от -64.5 до -63.8 ‰, а  $\delta^{18} O_{VSMOW}$  – от -2.0 ‰ до +1.4 ‰ и попадают в характерный для подземных вод юрских и доюрских образований Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна диапазон. Более того, полученные значения изотопного состава показывают, что поровые воды БС имеют преимущественно морское происхождение в закрытых бассейнах, то есть действительно

являются глубинной захороненной морской водой, а не техногенной жидкостью, попавшей в керн при бурении.

Измеренное содержание химически связанной воды составляет 0.43–6.40 мас. % (рис. 2) и для большинства образцов значительно превосходит содержание свободной и физически связанной воды.

Установлено, что суммарная величина ЕКО составляет 2.87–5.42 смоль/кг (рис. 2). В составе обменного комплекса обнаружено содержание  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  и  $Na^+$ . Следует отметить, что  $Na^+$  является доминирующим катионом (71–87 % от общего ЕКО). В целом полученные величины ЕКО образцов БС согласуются с ЕКО сланцевых пород различных геологических формаций, таких как Bakken (5.4–10.5 мг-экв/100 г), Monterey (до 14 мг-экв/100 г), Haynesville (2–4 мг-экв/100 г) и др. [13].

В ходе анализа полученных данных установлено, что величина ЕКО в исследуемых образцах в разной степени зависит от содержания органического вещества и глинистых минералов (рис. 3), то есть от содержания компонентов с максимальными величинами ЕКО. При увеличении содержания глин наблюдается рост значений ЕКО, очевидной зависимости ЕКО и ТОС не обнаружено (рис. 3, a), однако наблюдается общая тенденция снижения ЕКО при увеличении содержания параметров  $S_1$  и  $S_2$  по пиролизу (рис. 3,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ).

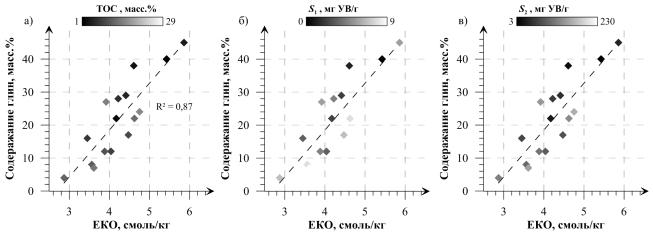


Рис. 3. Соотношение ЕКО с содержанием глинистых минералов и ТОС (a), параметрами  $S_1$  ( $\delta$ ) и  $S_2$  (a) по пиролизу.

Согласно общепринятым представлениям, исходное ОВ образовалось вследствие трансформации остатков морских растений и организмов в результате седименто- и литогенеза и должно было иметь высокие значения ЕКО (150–900 мг-экв / 100 г). В процессе диа- и катогенеза при повышенной температуре и давлении ОВ претерпевает ряд изменений, ведущих к потере участков поверхности, способных к ионному обмену из-за полимеризации функциональных групп. В результате ЕКО дебитуминизированного ОВ снижается вплоть до 0.5 мг-экв / 100 г [14]. Получается, чем более высокой степенью зрелости обладает дебитуминизированное ОВ, тем менее оно способно к ионному обмену, что мы и наблюдаем по полученным для образцов БС результатам (рис. 3).

С помощью косвенного метода водных вытяжек и с использованием данных состава обменных катионов установлено, что состав поровых вод образцов БС преимущественно хлоридный натриевый с минерализацией 2.32–22.59 г/л (рис. 3). Полученные значения соотносятся с минерализацией вод неокомского и верхнеюрского водоносных комплексов центральных районов Западно-Сибирского мегабассейна (10.84–26.63 г/л) [15, 16]. Выявленная изменчивость состава и минерализации поровых вод БС может быть связана с широким шагом отбора образцов керна (около 2 м), а также с известной неоднородностью химико-минерального состава отложений даже в пределах одной скважины.

Результаты исследования показывают, что использование комплексного подхода позволило получить новые и точные данные о химическом и изотопном составе, содержании

различных видов воды в слабопроницаемых отложениях БС с изначально низкой влажностью (менее 1–5 мас. %). Полученные результаты дополняют небольшую и сильно разрозненную гидрогеохимическую базу данных для интервала глубин отложений БС, могут быть использованы при геофизической интерпретации каротажных данных и оценки запасов углеводородов.

- 1. Дорофеева Т.В., Краснов С.Г., Лебедев В.А., Петрова Г.В., Позиненко Б.В. Коллекторы нефти баженовской свиты Западной Сибири. М.: Недра, 1983. 131 с.
- 2. Силич В.Е. Поровые воды пород баженовской свиты Салымского нефтяного месторождения. Строение и нефтегазоносность баженитов Западной Сибири // Сборник научных трудов. 1985. С. 87–91.
- 3. Балушкина Н.С., Калмыков Г.А., Кирюхина Т.А., Коробова Н.И., Корост Д.В. и др. Закономерности строения баженовского горизонта и верхов абалакской свиты в связи с перспективами добычи нефти из них // Геология нефти и газа. 2013. 3. С. 48–60.
- 4. Kazak E.S., Kazak A.V. A novel laboratory method for reliable water content determination of shale reservoir rocks. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. 106301.
- 5. Kazak E.S., Kazak A.V. An Integrated Experimental Workflow for Formation Water Characterization in Shale Reservoirs: A Case Study of the Bazhenov Formation // SPE Journal. 2021. 1 (SPE-205017-PA). P. 1–16.
- 6. Kazak E.S., Kazak A.V. Experimental features of cation exchange capacity determination in organic-rich mudstones // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2020. 83. 103456.
- 7. Козлова Е.В., Калмыков Г.А., Ганичев Д.И., Балушкина Н.С. Формы нахождения углеводородов в породах баженовской свиты // Геофизика. 2015. № 3. С. 15–22.
- 8. Конторович А.Э и др. Твёрдые битумы баженовской свиты Западно-Сибирской плиты и главные особенности их геохимии // Геохимия. 1999 (8). С. 888–896.
- 9. Labus M., Labus K., Bujok P. Determination of the pore space parameters in microporous rocks by means of thermal methods // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2015. 127. C. 482–489.
- 10. Handwerger D.A. et al., Improved petrophysical core measurements on tight shale reservoirs using retort and crushed samples // SPE 147456. 2011. P. 1–21.
- 11. Wood J.M., Crushed-Rock Versus Full-Diameter Core Samples for Water-Saturation Determination in a Tight-Gas Siltstone Play // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. 2015. 18 (03). P. 407–416.
- 12. Odusina E.O., Sondergeld C.H., Rai C.S. NMR Study of Shale Wettability, in Canadian Unconventional Resources Conference. Calgary, Alberta, Canada: Society of Petroleum Engineers. 2011. P. 15.
- 13. Saidia, M., Godinez L.J., Prasad M. Effect of clay and organic matter on nitrogen adsorption specific surface area and cation exchange capacity in shales (mudrocks) // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016. 33. P. 1095–1106.
- 14. Derkowski A., Bristow T.F. On the problems of total specific surface area and cation exchange capacity measurements in organic-rich sedimentary rocks. // Clays and Clay Minerals. 2012. Vol. 60. P. 348–362.
- 15. Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Конторович А.Э., Плавник А.Г. Вертикальная и латеральная гидрохимическая зональность, типизация подземных вод Западно-Сибирского бассейна // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2006. 5–6. С. 58–84.
- 16. Новиков Д.А., Шварцев С.Л. Гидрогеологические условия предъенисейской нефтегазоносной субпровинции // Геология и геофизика. 2009. 50 (10). С. 1131–1143.

## ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КАРСТОВЫХ МАССИВОВ В РАЙОНАХ НЕФТЕДОБЫЧИ В ПЕРМСКОМ КРАЕ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-336-340

Катаев В.Н., Ермолович И.Г.

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, kataev@psu.ru, ermol@psu.ru

Аннотация. Эксплуатация нефтяных месторождений практически всегда оказывает негативное влияние на состояние природной среды. Скважинная нефтедобыча на месторождениях с длительной эксплуатационной историей часто сопровождается экологическими проблемами. В настоящей статье рассмотрены особенности углеводородного загрязнения подземных вод в районах нефтедобычи. В Пермском крае особые проблемы экологического характера возникают в пределах месторождений, эксплуатируемых с первой половины XX в., геологическое строение которых в зоне активного водообмена характеризуется наличием карстующихся пород. Проблема оперативной фиксации нефтяного загрязнения подземных вод карстовых массивов обусловлена рядом факторов: слабой естественной защищенностью подземных вод, высокой степенью развития поверхностных форм карста, структурой подземной трещинно-карстовой дренажной системы, особенностями гидродинамики карстовых массивов.

Ключевые слова: карстовый массив, подземные воды, нефтяные месторождения, загрязнение.

**Abstract.** Exploitation of oil fields almost always has a negative impact on environment. Well oil production in fields with a long operational history is often accompanied by environmental problems. This article discusses the features of hydrocarbon pollution of underground water in the areas of oil production. In the Perm Region, special environmental problems arise within the fields that have been exploited since the first half of the twentieth century, the geological structure of which in the zone of active water exchange is characterized by the presence of karst rocks. Problem operative fixation of oil pollution of groundwater karst massifs due to several factors: weak natural protection of groundwater, a high degree of development of superficial forms of karst, underground structure fracture-karst drainage system, features of the hydrodynamics of karst massifs.

Key words: karst massif, underground water, oil fields, pollution.

Скважинная нефтедобыча на месторождениях с длительной эксплуатационной историей в пределах районов активного развития карста, особенно сульфатного и карбонатно-сульфатного, часто сопровождается определенными экологическими проблемами. С позиции гидрогеологии особое внимание следует уделять тем районам, где карстующиеся породы находятся в зоне активного водообмена.

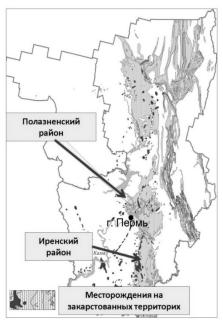


Рис. 1. Нефтяные месторождения в пределах карстовых районов Пермского края.

В этих районах, как показывает практика оценки состояния вод приповерхностной гидросферы преимущественно методами гидрогеохимического мониторинга, негативное воздействие нефтепромыслового техногенеза зачастую фиксируется только визуально уже на стадии выхода подземных вод с нефтяной пленкой на поверхность в русло поверхностного водотока [1]. Площадь Пермского края составляет 160600 км², а площадь активно карстующихся пород занимает 28.6 % территории, или почти 46 тыс. км². За последние восемь десятков лет в Прикамье было открыто 234 нефтегазовых месторождения общей площадью около 3000 км². Многие из эксплуатируемых месторождений расположены в пределах карстовых районов. Их общая площадь составляет более 1200 км², или 40 % от общей площади нефтяных месторождений (рис. 1) [2].



Рис. 2. Иренский карстовый район. Плотность поверхностных карстопроявлений в пределах нефтяных месторождений (Кыласовское, Кокуйское, Чураковское). I — участки с плотностью карстовых воронок от 80 до 250 шт /км $^2$ .

Наиболее яркими примерами осложнения экологии районов, в большей степени связанными с загрязнением нефтепродуктами подземных и поверхностных вод, являются сложившиеся обстановки в Полазненском и Иренском карстовых районах.

В генерализованном виде, по данным поискового бурения до глубин 1850 м, геологический разрез районов представлен в основном толщей известняков и доломитов девонской, каменноугольной и пермской систем. Общая мощность карбонатного типа разреза составляет 1700 м. Выше залегает иренская карбонатно-сульфатная серия, в стратиграфическом отношении представленная отложениями иренского горизонта кунгурского яруса нижней перми с изменяющейся мощностью от 14 до 190 м. Иренский горизонт с поверхности размыт на разную глубину и превращен в карстовую брекчию (обвально-карстовые отложения). Классический, небрекчированный ТИП разреза карбонатно-сульфатный, четыре где чередуются сульфатных пачки (лунежская, демидковская, шалашнинская, ледяно-пещерская), представленные ангидритом с тонкими прослоями доломита, гипса, глины, и три карбонатных пачки (тюйская, елкинская, неволинская) сложенные доломитами с включениями ангидрита и гипса. Горизонт фрагментарно перекрыт переслаивающимися известняками, мергелями и песчаниками соликамского горизонта уфимского В основном покровы яруса.

четвертичными отложениями аллювиального и элювиально-делювиального генезиса мощностью до 40 м.

Оба карстовых района характеризуются большим разнообразием поверхностных карстовых форм (воронки, провалы, поноры, депрессии, рвы, суходолы). Наиболее многочисленны карстовые и карстово-суффозионные воронки, плотность которых в Полазненском районе достигает 60 карстовых форм/км², а в Иренском – от 30 до 300 форм и более на 1 км² (рис. 2). Подземные полости встречаются повсеместно в интервале глубин от 5 до 15 м. Их средние вертикальные размеры крайне редко превышают 2.0 м. Типичными являются полости и малые пещеры с объемом от 50 до 2500 м³. В пределах глубинных интервалов развития полостей объем поглощения промывочной жидкости может достигать 16 м³/час.

В гидрогеологическом отношении иренская карбонатно-сульфатная серия водоносна только на участках их выхода на поверхность или при неглубоком залегании от поверхности. С погружением пород под более молодые отложения серия выделяется как водоупорный комплекс. В закарстованных породах иренской серии развиты разобщенные водотоки и водоносные горизонты. Глубина залегания подземных вод изменяется от 10 до 80 м. Наибольшая глубина залегания подземных вод – от 70 до 80 м – фиксируется на водораздельных пространствах. Дебиты родников, как правило, изменяются от 0.1 до 3.0 л/с, а в некоторых случаях – от 40 до 200 л/с, минерализация вод 2.5–3.0 г/дм<sup>3</sup>. Характерной особенностью подземных вод является преобладание SO<sub>4</sub>-Ca состава, стабильно высокая минерализация и высокая жесткость. Наибольшая водообильность пород наблюдается на закарстованных участках, приуроченных зонам К неотектонических поднятий. Гидрогеологическая дифференциация верхней части разреза и водообильность трещинных зон усиливаются в районах неотектонической активности и особенно ярко проявляются в пределах локальных тектонических структур на фоне специфической блоково-дизъюнктивной структуры карстовых массивов.

Причиной загрязнения карстовых массивов является их высокая природная проницаемость и, как правило, низкая естественная защищенность подземных трещинно-каверновых (трещинно-карстовых) вод как с поверхности массива, так и с нижней части разреза, особенно в зонах дизъюнктивов, обеспечивающих вертикальные локализованные перетоки вод относительно глубоких водоносных горизонтов через нарушенные флюидоупоры.

Нефтяные загрязнения по причинам возникновения подразделяются на природные глубинные, техногенные глубинные и поверхностные [1, 3, 4].

Техногенные поверхностные загрязнения связаны с нарушением правил добычи и транспортировки нефти (разлив нефти при прорывах нефтепроводов, неисправности оборудования устьев скважин, подземном ремонте скважин, технологических установок сбора и подготовки нефти), сбросом нефти и нефтепродуктов на закарстованную поверхность (в карстовые лога, воронки) при производстве ремонтных и ликвидационных работ на эксплуатационных скважинах, переводе эксплуатационных скважин с нефти на газ.

Техногенные глубинные загрязнения связаны с созданием высоких давлений при закачке воды в продуктивные пласты, с нарушением герметичности скважин — некачественной цементацией в нагнетательных скважинах (прорывы колонн и нарушения цементного кольца) и, как следствие, миграцией нефти за счет выдавливания из недр по трещинным приразломным зонам, заколонным пространствам скважин через перекрывающие породы.

Природные глубинные факторы обусловлены гидродинамическими эффектами в земной коре и сводятся к прямой восходящей фильтрации флюидов из продуктивных горизонтов по зонам субвертикальной дизъюнктивной нарушенности, активизированной в неоген-четвертичное время.

Отметим, что нефтегазопроявления в районах нефтедобычи в Пермском крае фиксируются по всему палеозойскому разрезу осадочного чехла, в том числе слабые и

обильные в карстующихся отложениях кунгурского яруса Полазненского, Кокуйского, Чураковского, Таныпского и других месторождений нефти до глубины 150–190 м [1].

Теория естественной вертикальной миграции глубинных пластовых флюидов на сегодняшний день поддерживается многими исследователями флюидодинамики. Более того, если раньше считалось, что вертикальная (внерезервуарная, межформационная) миграция нефти в основном совершается по крупным разломам и нарушениям, то впоследствии экспериментальным путем была доказана возможность перемещения углеводородов и через слабопроницаемые покрышки перпендикулярно к напластованию пород без разрыва их сплошности [5].

Нарушение флюидоупоров на всю наднефтяную толщу горных пород в зонах разломов, несомненно, затрагивает и карбонатно-сульфатную толщу пород иренского горизонта, ее приповерхностную зону с гидрогеологически активными карстовыми полостями и расширенными растворением трещинами. Попадая в зону влияния гидродинамического режима карстового массива (зону активного водообмена), компоненты пластовых флюидов могут быть захвачены потоками гидродинамической зоны горизонтальной циркуляции, развивающейся на уровне локального базиса эрозии, а при смене уровенного режима в различные сезоны года пластовые флюиды могут проникать и в переходную зону (зону сезонного изменения уровня подземных вод). Воды обеих зон разгружаются в эрозионных врезах (карстово-эрозионных логах, долинах рек) в виде родников или высачивания на разных высотных отметках приподошвенной части врезов в зависимости от положения уровня подземных вод.

В Полазненском карстовом районе с 1939 г. эксплуатировалось одноименное месторождение нефти, приуроченное к долине р. Камы. Промышленные залежи нефти на Полазненском месторождении связаны с нефтеносными толщами нижнего и среднего карбона. Нефтепроявления были отмечены и в известняках верхнего карбона. Нефть Полазненского месторождения легкая, с высоким содержанием бензина, сернистая, смолистая, высокопарафинистая. Воды в нефтяных пластах Cl-Ca типа с минерализацией до 286 г/л. После создания Камского водохранилища в 1954 г. эксплуатационные скважины месторождения оказались в прибортовой и прибрежной зонах водохранилища. На начальных этапах существования водохранилища нефтепроявления в его акватории отсутствовали. Разгрузка нефтепродуктов в Камское водохранилище началась в 70-х годах ХХ в. и фиксируется до настоящего времени. Специальными исследованиями сотрудников Естественно-научного института Пермского университета было установлено, что на глубине 30-35 м на поверхности трещинно-карстовых вод в закарстованных породах кунгурского яруса сформирована линза нефти мощностью от 1 до 10 м. По составу нефть в линзе близка к нефти разрабатываемой залежи, но она окислена, без бензиновых высокомолекулярных парафиновых углеводородов. Минерализация вод водохранилища на участках разгрузки нефти в девять раз (до 3.45 г/дм<sup>3</sup>) превышает значения минерализации вне этих участков, а содержание нефтепродуктов в 165 раз (до 13.2 мг/дм<sup>3</sup>) превышает таковые значения вне участков загрязнения [2, 6].

В Иренском районе развития сульфатного и карбонатно-сульфатного карста разрабатываются 17 месторождений углеводородного сырья. Из этих месторождений Кыласовское эксплуатируется с 1963 г., Кокуйское – с 1965 г., Чураковское – с 1975 г. В пределах этих месторождений периодически фиксируются нефтепромысловые загрязнения поверхностных и подземных вод, выражающиеся в появлении нефти в родниковых котловинах [7]. Отметим, что многие малые реки карстового района берут начало именно в родниковых котловинах, где и происходит максимальное накопление нефти, взвешенных частиц тонкодисперсной фракции и гелеобразной взвеси. Аналогично примеру, приведенному по Полазненскому месторождению, в пределах месторождений в Иренском районе зафиксированы скопления углеводородных газов, рассолов и жидких углеводородов в виде техногенных залежей на глубине до первых десятков метров от поверхности земли. Линзы углеводородов были зафиксированы при площадной съемке методом ВЭЗ в районе долины р. Тураевка (Кокуйское месторождение) на глубине 50–60 м, на уровне залегания

трещинно-карстовых вод [8]. По нашему мнению, одной из причин восходящего движения глубинных трещинно-карстовых вод к поверхности, например в пределах Кокуйского месторождения с глубин 1200–1600 м (от каменноугольных карбонатов через нижнепермские карбонаты до сульфатно-карбонатной толщи кунгурского яруса), могла быть закачка вод в продуктивные горизонты при разработке месторождения.

Основной экологической проблемой карстовых массивов в пределах разрабатываемых нефтяных месторождений, связанной как с вертикальной миграцией флюидов, так и с загрязнением с поверхности, является формирование углеводородных газов, рассолов и жидких углеводородов в виде техногенных залежей в приповерхностной зоне массива. Углеводородные газы при определенном условии — наличии в перекрывающих отложениях слабопроницаемых слоев — могут проявляться в массиве выше эрозионных врезов. Жидкие углеводороды и рассолы могут скапливаться в трещинах и карстовых полостях, являясь источником долговременного присутствия нефтепродуктов в пресных подземных водах. Находясь длительное время в зоне гипергенеза (в аэробных условиях в зоне активного водообмена и частично в анаэробной обстановке в зоне замедленного водообмена), нефть преобразуется и теряет геохимические маркеры, характерные для «свежего» нефтяного загрязнения. При этом в подземных водах при низкой концентрации нефтепродуктов высокая концентрация хлоридов может сохраняться в течение нескольких десятков лет [9, 10].

В настоящее время проблема оперативной фиксации нефтяного загрязнения подземных вод карстовых массивов в зоне активного водообмена остается нерешенной, поскольку техногенное воздействие на надпродуктивную толщу технологически не контролируется, в отличие от забоя, где возможен контроль, и поверхности, на которой располагается инфраструктура нефтепромысла [9]. Остается надеяться, что технологии поиска, геометризации и ликвидации проявлений нефтепромыслового техногенеза в приповерхностных зонах массивов горных пород появятся в нефтедобывающих компаниях, что, несомненно, позволит снизить техногенное влияние на природную среду в районах нефтедобычи.

- 1. Костарев С.М. Особенности нефтепромыслового загрязнения геологической среды карстовых районов Пермского края // Материалы Международного симпозиума «Экологическая безопасность и строительство в карстовых районах». Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун. 2015. Т. 2015. С. 317–322.
- 2. Максимович Н.Г., Первова М.С. Особенности нефтяного загрязнения закарстованных территорий Пермского края // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задача геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии: Материалы годичной сес. Научн. совета РАН по пробл. геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (20-21 марта 2008 г.). М.: ГЕОС, 2008. Вып. 10. С. 224–228.
  - 3. Быков В.Н. Нефтегазовое карстоведение. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2002. 351 с.
- 4. Оборин А.А., Хмурчик В.Т., Иларионов С.А., Макарова М.Ю., Назаров А.В. Нефтезагрязненные биогеоценозы (Процессы образования, научные основы восстановления, медико-экологические проблемы). Пермь: Перм. гос. ун-т; Перм. гос. техн. ун-т. 2008. 511с.
  - 5. Ботиева Т.А. Генетические основы классификации нефтей. М.: Недра, 1987. 196 с.
- 6. Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю. Методы борьбы с нефтяным загрязнением на закарстованных берегах водохранилищ // Экология урбанизированных территорий. № 4. 2009. С.55–58.
- 7. Катаев В.Н., Ермолович И.Г. Генезис и состав новообразований в малых реках территорий развития сульфатного карста // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П.Н. Чирвинского. 6 февраля 2018, Пермы: сб. науч. ст. / отв. ред. И.И. Чайковский; Перм. гос. нац. иссл. ун-т; Горный институт УрО РАН. Пермь, 2018. Вып. 21. С. 378-385.
- 8. Колесников В.П., Костарев С.М., Татаркин А.В. Применение методов и технологий электрометрии для поиска и геометризации техногенных скоплений флюидов в приповерхностной части геологической среды // Экологическая реабилитация промышленных производств и территорий. Сб. статей ФГУП МНИИЭКО ТЭК. Пермь, 2005. С. 288–301.
- 9. Костарев С.М. Формирование техногенных скоплений компонентов глубинных флюидов в приповерхностных массивах горных пород (на примере районов нефтедобычи Пермской области) // Известия вузов. Нефть и газ. 2004. № 5. С. 132–143.
- 10. Костарев С.М. Методы поиска техногенных скоплений флюидов в верхней части геологической среды нефтяных месторождений Пермского Прикамья // Геоэкология. 2005. № 6. С. 552–559.

# ГИДРОГЕОЛОГИЯ И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ КАРАБАШСКОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО БАССЕЙНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-341-345

Курчиков А.Р. $^{1,2}$ , Плавник А.Г. $^{1,2}$ , Ицкович М.В. $^{1,2}$ 

<sup>1</sup>Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень, plavnikag@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Аннотация. В работе приводятся результаты анализа геотемпературных, гидродинамических и гидрогеохимических условий юрско-меловых отложений Карабашской зоны Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. Выполнена оценка возраста подземных вод и их соотношения с возрастом вмещающих пород. Выявлена существенная вертикальная миграция подземных вод, которая приурочена к относительно молодым и активным тектоническим зонам. Установлено, что эффективность применения традиционных гидрогеологических критериев для оценки нефтегазоносности рассматриваемых отложений осложняется существенной неравномерностью их изученности, небольшими пределами изменения гидрогеологических показателей и недостаточной отработанностью комплексного анализа всех гидрогеологических данных. Для повышения эффективности анализа гидрогеологических условий необходимо применение комплексного учета имеющейся многопараметрической информации с использованием современных математических методов обработки ее больших объемов.

**Ключевые слова:** гидрогеологические условия, критерии, нефтегазоносность, Карабашская зона, Западно-Сибирский бассейн.

Abstract. The paper presents the geo-temperature, hydrodynamic and hydrogeochemical analysis results for the Jurassic-Cretaceous deposits settings of the West Siberian oil and gas basin Karabash zone. The estimation of the groundwater age and their relationship with the age of the host rocks is carried out. Revealed the significance of vertical groundwater migration manifestation, which is confined to relatively young and active tectonic zones. It is established that the effectiveness of the use of traditional hydrogeological criteria for assessing the oil and gas content of the sediments is complicated. Main factors are significant unevenness of testing points, small changes in hydrogeological indicators and complication of all hydrogeological data comprehensive analysis. To increase the efficiency of the hydrogeological settings analysis, it is necessary to use a comprehensive accounting of the available information using modern mathematical methods for processing large volumes of multi-parameter information.

Key words: hydrogeological settings, criteria, oil and gas content, Karabash zone, West Siberian basin.

Исследования гидрогеологических условий при оценке нефтегазоносности отложений имеют длительную историю, богатый опыт применения их результатов и базируются на выявлении характерных элементов режима подземных вод и связанных с ним особенностей их химического состава. Анализ гидрогеологических условий нашел активное применение и при поисково-разведочных работах в Западной Сибири, особенно на начальных этапах их проведения. С ростом степени изученности территории направленность гидрогеологического анализа по объективным причинам смещается от регионального к субрегиональному уровню и в область прикладной нефтегазопромысловой гидрогеологии [1–5]. В этих условиях возникает необходимость в оценке достоверности методов анализа свойств водоносных комплексов в задачах прогноза нефтегазоносности на современном этапе освоения ресурсов Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна и определения возможных путей повышении эффективности их применения.

В данной работе эти вопросы рассматриваются на основе результатов комплексного исследования, проведенного сотрудниками ряда ведущих научно-исследовательских организаций страны, полученных при выполнении работ по уточнению строения осадочного чехла и доюрского фундамента Карабашской зоны Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна с целью выявления участков, перспективных в отношении генерации углеводородов и формирования их месторождений [6].

Рассматриваемая зона располагается преимущественно в южной части Тюменской области и, частично, на территории Свердловской области. Зона в южной и юго-западной части практически полностью охватывает Карабашскую моноклиналь, Тобольский мегавал, Тюменскую мегаложбину, Тавдинский мегавыступ на северо-западе и Фроловскую мегавпадину на северо-востоке.

Всего в пределах Карабашской зоны, а также сопредельных с ней территорий проведен анализ химического состава более 1000 проб подземных вод глубоких горизонтов, выполнено около 260 анализов состава водорастворенного газа, немногим более 120 определений газонасыщенности подземных вод. Гидродинамические и геотермические исследования проведены более чем в 250 скважинах. Основной объем исследований приурочен к разведанным месторождениям, которые расположены в периферийный северных и северо-восточных зонах рассматриваемых в данной работе регионов.

Для детализации геотермических условий выполнено построение карт современных температур по кровле основных горизонтов, а также карта нормального глубинного теплового потока. Эти построения осуществлены на основе адаптации квазитрехмерных моделей современных температур Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, представленных в [7] и дополненных актуальными данными.

В пределах изучаемого района детальность гидродинамических исследований в поисково-разведочных скважинах невысока. В 24 скважинах осуществлено 36 исследований с определением пластовых давлений апт-альб-сеноманского водоносного комплекса, в 71 скважине 100 исследований — неокомского комплекса и в 158 скважинах 199 исследований — юрского водоносного комплекса. В целом пластовые давления по апт-альб-сеноманскому комплексу соответствуют гидростатическому, с небольшими, до 5 атм, отклонениями. По неокомскому и юрскому комплексам отклонения в целом до 5 атм, местами более 5 атм, на отдельных участках более 10 атм.

Имеющиеся анализы проб подземных вод отобраны при испытании более 360 разведочных скважин, ими охарактеризованы более 120 площадей на рассматриваемой территории. Водоносные комплексы характеризуются различной степенью изученности свойств подземных вод и неоднородностью расположения точек отбора проб. Большая часть данных приурочена к неокомским отложениям.

Прослеживаются характерные черты сходства гидрогеохимического облика подземных вод рассматриваемых комплексов. Воды близки по значениям минерализации, содержанию основных компонентов — натрия, хлора, кальция и магния, а также по микрокомпонентному составу. Подземные воды юрских отложений характеризуются повышенными значениями гидрокарбоната и сульфата. Основным компонентом растворенного газа подземных вод рассматриваемых отложений является метан.

По классификации В.А. Сулина основная масса проб подземных вод относится к хлоридно-кальциевым и гидрокарбонатно-натриевым, значительно меньшее количество хлоридно-магниевых и сульфатно-натриевых вод. В сеноманских отложениях преобладают хлорилно-кальшиевого типа. В неокомских возрастает гидрокарбонатно-натриевых вод, a юрские подземные воды характеризуются преимущественно гидрокарбонатно-натриевым составом.

Практически повсеместно по площади рассматриваемого района опробованы хлоридно-кальциевые воды. Наличие гидрокарбонатно-натриевого типа отмечается на севере и северо-востоке территории, а также на юго-западе области в неокомских и юрских отложениях. Наличие вод хлоридно-магниевого состава наблюдается в неокомских отложениях на юго-западе и вдоль южной границы Уватского НГР, в юрских отложениях единичные пробы протягиваются с северо-запада на юго-восток территории.

Районы расположения месторождений углеводородов по данным опробований подземных вод юрского и неокомского комплексов характеризуются преобладанием вод гидрокарбонатно-натриевого типа (по Сулину В.А.).

Подземные воды апт-альб-сеноманского комплекса охарактеризованы 106 пробами из 56 скважин. Минерализация в среднем составляет 13.3 г/дм $^3$ . Центральная часть рассматриваемого района характеризуется значениями минерализации от 12 до 15 г/дм $^3$ , прослеживается общий тренд к снижению этого показателя в северо-восточном и западном направлении. Увеличение минерализации отмечается в юго-восточном направлении до 18 г/дм $^3$ .

Среднее значение минерализации подземных вод неокомского комплекса немного ниже, чем апт-альб-сеноманского, и составляет  $12.9 \, \text{г/дм}^3$ , направление изменения параметра аналогично изменению минерализации в апт-альб-сеноманском комплексе. Но в центральной части значения более высокие — от  $14 \, \text{до} \, 18 \, \text{г/дм}^3$ . В водах юрского комплекса здесь также наблюдаются повышенные значения минерализации ( $16-20 \, \text{г/дм}^3$ ), которые уменьшаются в западном и северо-восточном направлении до  $8 \, \text{г/дм}^3$ . Газонасыщенность и состав водорастворенных газов подземных вод апт-альб-сеноманских отложений определены в значительно меньшем количестве, чем данные по ионно-солевому составу и основным микрокомпонентам.

С помощью гелий-аргонового метода по формуле А.Л. Козлова проведена оценка времени формирования подземных вод во вмещающих породах осадочного чехла. Для юрских данных среднее значение в целом соответствует возрасту вмещающих отложений. По сравнению с возрастом неокомских отложений, содержащиеся в них воды по среднему показателю соотношения гелия и аргона существенно более древние (относятся к юрскому периоду). Для апт-альб-сеноманских вод средняя оценка их возраста ниже возраста вмещающих отложений (100–120 млн. лет). Это может свидетельствовать о масштабности путей для вертикальной миграции по разрезу отложений на рассматриваемой территории. Сопоставление морфологических особенностей структурных планов водоносных комплексов с повышенным содержанием отдельных компонентов ионно-солевого состава подземных вод также подтверждает существенность проявления вертикальной миграции подземных вод, которая приурочена к относительно молодым (постнеокомским) и активным тектоническим зонам.

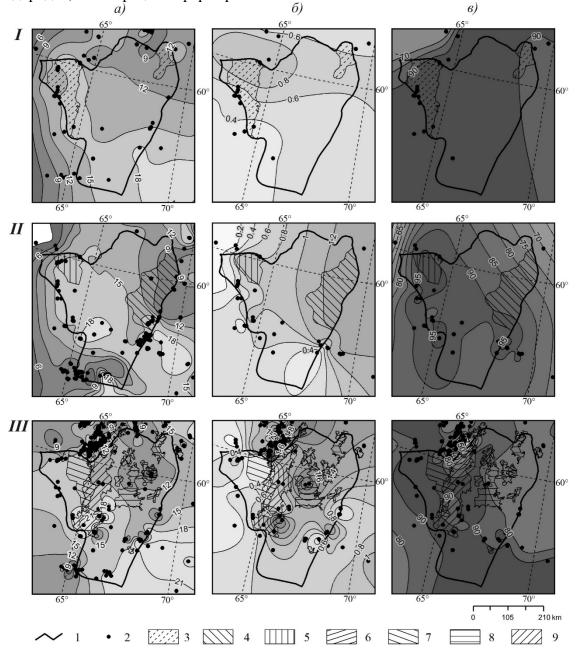
К настоящему моменту в Карабашской зоне проведен большой объем геологогеофизических исследований. Этот комплекс обеспечил возможность существенной детализации анализа и прогноза перспективных в отношении нефтегазоносности районов [6]. В результате выполненных исследований для отдельных нефтегазоносных комплексов мезозойских отложений, а также для пласта II Вогулкинской толщи и для аномальных баженовской свиты выделены участки, перспективные разрезов нефтегазоносности. Территориально они сгруппированы преимущественно в восточной и западной частях Карабашской зоны. Центральная, субмеридиональная и южная часть зоны по всему разрезу осадочного чехла отнесены к малоперспективным на нефть и газ (рисунок). Здесь же приведены карты минерализации, газонасыщенности подземных вод и содержания метана в водорастворенном газе.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что материалы обработки и интерпретации гидрогеохимических, геотермических и гидродинамических данных не позволяют выявить выраженную дифференциацию отложений изучаемого района по этим показателям. Установленные закономерности по отдельным параметрам с учетом расположения открытых месторождений углеводородов позволяют сделать лишь предположительные выводы о том, что по гидрогеологическим критериям повышенными в отношении перспектив нефтеносности являются сопредельные с границами Карабашского НГР юго-западные (характеризующиеся повышенным значением теплового потока) и восточные (с признаками элизионного отжатия вод из глин баженовской свиты) периферийные участки.

Такие выводы имеют очевидные недостатки, связанные с большой неопределенностью в выделении границ возможных перспективных зон по гидрогеологическим данным. Но существенно более серьезным является то, что полученные выводы слабо согласуются с результатами выполненного комплексного анализа геологогеофизических работ, проведенных в Карабашской зоне.

Можно выделить несколько основных, на наш взгляд, факторов, определивших недостатки результатов проведенного анализа гидрогеологических условий. Первый связан с объективными проблемами отсутствия прямой зависимости между гидродинамическими, гидрогеохимическими и геотермическими параметрами водоносных отложений,

определяемых в достаточно массовых количествах, и процессами образования углеводородов, их миграции и формирования залежей.



Изменчивость гидрогеохимических показателей: a — минерализация, г/дм³;  $\delta$  — газонасыщенность, дм³/дм³;  $\delta$  — содержание метана, %. I — апт-альб-сеноманский, II — неокомский, III — юрский комплексы; I — граница карабашской зоны; 2 — поисковоразведочные скважины; 3—9 — зоны, перспективные на поиск углеводородов: 3 — в аптском НГК (нефтегазоносный комплекс), 4 — в осложненном неокомском НГК, 5 — в неосложненном неокомском НГК, 6 — в аномальном разрезе баженовской свиты, 7 — в пласте II вогулкинской толщи, 8 — в нижнеюрском НГК, 9 — в среднеюрском НГК.

Существенным фактором является то, что основной объем фактических данных о гидрогеологических условиях отложений в Карабашской зоне приурочен к разведанным месторождениям, которые расположены в периферийных северных и северо-восточных зонах рассматриваемых в данной работе регионов. А применение традиционных подходов с построением карт и разрезов изучаемых параметров ограничивает надежность прослеживания закономерностей изменения параметров на большей части рассматриваемого

района исследований и тем самым снижает достоверность оценки перспектив нефтегазоносности в слабоизученных зонах по гидрогеологическим показателям.

Другим очевидным недостатком является исключение из рассмотрения данных о строении и свойствах изучаемых отложений, полученных в ходе проведения специализированных работ. Особенно существенным представляется неучет сложного тектонического строения изучаемой зоны. С учетом данных об обнаруженных и предполагаемых многочисленных разнонаправленных и сложной геометрии разломах доюрского основания видно, что заложенные в основу интерпретации гидрогеологических условий предположения о выдержанности условий осадконакопления не подтверждаются. Добавим, что приведенные выше данные по анализу особенностей пространственного расположения проб с повышенным содержанием минерализации, йода и гидрокарбоната также подтверждают существенность влияния тектонических факторов на характер гидрогеохимического режима отложений. Еще одним важным недостатком представляется раздельный анализ каждого из показателей, характеризующих гидродинамические, гидрогеохимические и геотермические условия осадочного чехла.

В этих условиях разработка подходов и методов единого, комплексного анализа всей имеющейся гидрогеологической информации, совместно с доступными данными об особенностях строения изучаемых отложений, является актуальной задачей, определяющей возможности дальнейшего развития нефтегазовой гидрогеологии и повышения эффективности ее практического применения при поиске и разведке месторождений углеводородов.

Эта задача всегда рассматривалась в качестве одной из ключевых, однако разнородность физических процессов, контролирующих комплекс гидрогеологических параметров, определяет сложность и существенную незавершенность ее решения к настоящему времени. Одним из наиболее перспективных, на наш взгляд, подходов является применение современных математических методов обработки больших объемов многопараметрической информации, в частности методов искусственного интеллекта, которые направлены на выявление взаимосвязей между множеством аргументов и целевыми показателями.

- 1. Карцев А.А., Курчиков А.Р., Матусевич В.М. Фундаментальные и прикладные проблемы нефтегазовой гидрогеологии // Подземная гидросфера: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Иркутск: Изд-во ООО «Гео-граф», 2012. С. 328–329.
- 2. Курчиков А.Р., Плавник А.Г. Кластеризация гидрогеохимических данных в задачах оценки прогнозных ресурсов углеводородов нефтегазоносных комплексов Западной Сибири // Геология и геофизика. 2009. № 11 (50). С. 1218–1226.
- 3. Новиков Д.А. Перспективы нефтегазоносности среднеюрских отложений полуострова Ямал по гидрогеологическим данным // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2013. № 6 (3). С. 65–74.
- 4. Плавник А.Г., Плавник Г.И., Ицкович М.В., Олейник Е.В. Гидрохимическая характеристика клиноформных нефтегазоносных резервуаров БВ4-5, БВ6-7 и БВ8-9 // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа (десятая научно-практическая конференция). Т. 1 / Ред. В.И. Карасев, А.В. Шпильман, В.А. Волков. Ханты-Мансийск: ИздатНаукаСервис, 2007. С. 205–212.
- 5. Шварцев С.Л., Новиков Д.А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2004. № 8 (45). С. 1008–1020.
- 6. Уточнение геолого-геофизической модели строения, выявление и картирование нефтегазоперспективных зон в отложениях осадочного чехла и доюрского основания, оценка ресурсов выявленных объектов и обоснование первоочередных участков к программе лицензирования Карабашской зоны / Ред. В.А. Волков. Тюмень: АУ «НАЦ РН им. В.И. Шпильмана», 2014. 1181 с.
  - 7. Курчиков А.Р. Гидрогеотермические критерии нефтегазоносности. М.: Недра, 1992. 231 с.

# ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В ОСАДОЧНОМ ЧЕХЛЕ КУРЕЙСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-346-349

Литвинова И.В., Сурнин А.И.

AO «Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья», Новосибирск, litvinova@sniiggims.ru

Аннотация. В статье показаны современные гидродинамические условия и дана общая региональная картина распределения пластовых давлений в нефтегазоносных комплексах осадочного чехла Курейской синеклизы (северо-западная часть Сибирской платформы) и ее сопредельных территорий. Приведена генетическая классификация причин формирования аномально высоких пластовых давлений (АВПД). Наблюдаемые зоны АВПД по всему разрезу согласуются с многочисленными высокодебитными рассолопроявлениями. Анализ гидродинамических закономерностей в разрезе осадочного бассейна дает представление о возможных направлениях миграции флюидов в осадочном чехле, что является важным фактором формирования, переформирования и размещения залежей нефти и газа.

**Ключевые слова:** Сибирская платформа, Курейская синеклиза, нефтегазоносный комплекс, гидродинамический режим, аномально высокое пластовое давление (АВПД).

Abstract. The article shows the current hydrodynamic conditions and gives a general regional picture of the distribution of reservoir pressures in the oil and gas complexes of the sedimentary cover of the Kurejskaya syneclise and adjacent territories. A genetic classification of the causes of the formation of abnormally high reservoir pressures (AVPD) is given. The observed AVPD across the entire section are consistent with high brine rates in wells (overflowwell). It is concluded that the studied hydrodynamic patterns give an idea of the possible directions of fluid migration in the sedimentary cover, which is an important factor in the formation, re-formation and placement of oil and gas fields.

**Key words:** Siberian platform, Kurejskaya syneclise, oil and gas complexes, hydrodynamic regime, abnormally high reservoir pressures (AVPD).

Гидродинамические условия нефтегазоносности Сибирской платформы рассматривались в работах А.С. Анциферова, М.Б. Букаты, В.И. Вожова, А.Е. Гуревича, А.А. Дзюбы, В.В. Павленко, Е.В. Пиннекера, Ю.И. Яковлева и других ученых и специалистов.

Оценка современных гидродинамических условий в осадочном чехле Курейской синеклизы выполнена для нефтегазоносных комплексов на эталонных месторождениях Катангской, Байкитской, Северо-Тунгусской и Южно-Тунгусской нефтегазоносных областей.

Данные, характеризующие гидродинамический режим рифей-вендского водоносного комплекса в Курейской синеклизе, немногочисленны. По единичным надежным измерениям пластовых давлений в параметрических скважинах на южном борту синеклизы в рифее преобладает режим гидростатический: Рпл/Руг ~1.0. Это соответствует гидростатическому режиму в рифейских отложениях на прилегающей территории Байкитской антеклизы.

Более полно гидродинамические условия разреза Курейской синеклизы изучены в пределах ее юго-западного борта в водоносных комплексах от венд-нижнекембрийского до верхнепалеозойско-нижнетриасового. В целом, в этих отложениях гидродинамическая обстановка более напряженная, чем в рифей-вендском комплексе: на всех уровнях вскрытого разреза преобладает сверхгидростатический гидродинамический режим с аномальностью пластовых давлений в диапазоне +(10-20) %. Нередко имеют место проявления АВПД с коэффициентом негидростатичности до  $\geq 1.40$ . Характерными примерами являются территории Бахтинского мегавыступа и внутренние районы погружения юго-западного и южного борта Курейской синеклизы (рис. 1).

Отдельное положение в гидродинамическом поле Курейской синеклизы занимает внешняя зона южного и юго-восточного борта Курейской синеклизы, которая входит в северный контур распространения галогенных формаций кембрия Сибирской платформы. По аналогии с прилегающими территориями Байкитской и Катангской седловины, здесь в межсолевых водоносных горизонтах венд-нижнекембрийского и кембрийского галогенно-

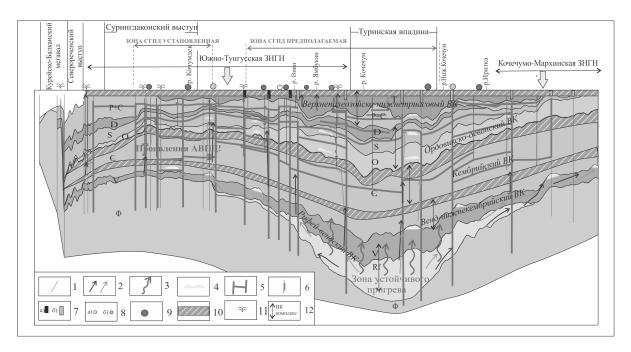


Рис. 1. Схематическая гидродинамическая модель осадочного чехла вдоль профиля р. Нижняя Тунгуска. I — разрывные нарушения; 2 — предполагаемый миграционный водногазовый поток; 3 — аномальный прогрев разреза; 4 — предполагаемые скопления; 5 — предполагаемое распределение траппов в разрезе; 6 — глубокие скважины с интервалами водопроявлений по результатам бурения и испытания скважин); 7 — а) битумопроявления, б) проявления кальцита оптического (исландского шпата); 8 — гидрогеохимические аномалии по: а) тяжелым УВ (ТУ) и гелию, б) проявления ароматических соединений; 9 — воды смешанного состава повышенной минерализации (более 1 г/л); 10 — основные региональные флюидоупоры; 11 — самоизливы скважин; 12 — региональные водоносные комплексы.

карбонатных комплексов прогнозируется гидродинамический режим высоких сверхгидростатических давлений, который обеспечивается пластично-упругими свойствами пластов соли.

Региональное гидродинамическое районирование осадочного чехла Курейской синеклизы выполнено по характеру гидродинамического режима. Для этого использован такой показатель, как коэффициент негидростатичности гидродинамической системы. Он представляет собой отношение пластового давления (Рпл.) к условному гидростатическому давлению (Ру.г.) столба пресной воды на глубине опробования. За уровень сравнения принимаем значение Рпл./Ру.г.=1.0, отражающее идеальную обстановку равновесия, к которому стремится любая природная гидродинамическая система [1]. Выявленные гидродинамические режимы приведены в таблице 1.

Наблюдаемая положительная «негидростатичность» пластовых давлений по разрезу изученной части территории Курейской синеклизы согласуется с многочисленными высокодебитными рассолопроявлениями в колонковых скважинах, напорными минерализованными источниками на поверхности и гидрогеохимическими аномалиями межпластовых перетоков рассолов. Это указывает на продолжающиеся процессы восходящей глубинной разгрузки флюидов в верхние горизонты разреза.

Миграция флюидов осуществляется по локализованным каналам, связанным с проводящими глубинными разломами, которые проявляются в геотермическом поле осадочного чехла Курейской синеклизы как устойчивые тепловые аномалии.

Изучение природы АВПД имеет важное теоретическое и практическое значение. Прежде всего, это необходимость прогноза АВПД в проектах освоения нефтегазоперспективных районов.

Наличие в поле давлений положительных аномалий свидетельствует либо о внедрении

избыточного флюида в коллектор, либо об изменении объема коллектора под воздействием на гидродинамическую систему внешних сил. Необходимым условием для сохранения АВПД на протяжении сколько-нибудь длительного времени является изолированность системы. Но о полной изоляции флюидных резервуаров говорить нельзя. Даже мощные глинистые толщи обладают проницаемостью, которая в конечном итоге приведет к разгрузке аномальности в замкнутом коллекторе [2]. Также нельзя исключать перманентные процессы разуплотнения флюидоупоров под действием тектонических движений, сейсмичности и катагенеза пород.

Таблица 1. Гидродинамические режимы водоносных комплексов Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции

Гидродинамический режим в водоносном (нефтегазоносном)	Значение коэффициента						
комплексе	негидростатичности						
РАВНОВЕСНЫЙ РЕЖИМ (квазигидростатический)							
Положительно-равновесный	Рпл./Руг.=1.00-1.10						
Отрицательно-равновесный	Рпл./Руг.=1.00-0.90						
НЕРАВНОВЕСНЫЙ РЕЖИМ							
Сверхгидростатический режим	Рпл./Руг.=1.10-1.25						
Режим аномально высоких пластовых давлений – АВПД	Рпл./Руг.=1.25-1.35						
Депрессионный режим аномально низких давлений – АНПД	Рпл./Руг = 0.9						

Ведущие механизмы формирования АВПД различными исследователями трактуются по-разному. Основными причинами АВПД в замкнутом коллекторе считают поступление воды в результате уплотнения глин, освобождения связанной воды при термодеструкции глинистых минералов и органического вещества, явление осмоса. Также рассматривается разгрузка высоконапорных флюидов из глубоких недр, процессы тектогенеза и другое.

В таблице 2 показана классификация представлений о генезисе АВПД.

Таблица 2. Генетическая классификация причин формирования АВПД [3]

Литогенетическая	Вертикально-	Эндогенно-	Гидродинамическая	
Литогенетическая	миграционная	энергетическая		
АВПД генерируют	АВПД генерирует	АВПД генерирует	АВПД генерируется в	
процессы,	вертикальная миграция	действие энергии	верхних гидро-	
происходящие в	флюидов независимо от	глубоких недр	геологических этажах в	
породах самого	исходных источников	(тепловой или	артезианских системах с	
чехла	миграции	механической)	большой амплитудой	

Перспективы нефтегазоносности территории Курейской синеклизы подтверждены открытием двух месторождений (Моктаконское ГН и Таначинское НГ) и промышленных притоков УВ на ряде площадей (Нижнетунгусская, Усть-Дельтулинская). Эта территория исследования является уникальной по своему геологическому строению и насыщенности интрузиями, обладает одним из наиболее полных разрезов палеозоя запада Сибирской платформы и интенсивной насыщенностью трапповыми интрузивами. Флюиды использовали те же пути, что и трапповая магма. Такой механизм позволяет более обоснованно объяснить пути образования современных геохимических и гидрогеологических аномалий, вследствие формирования траппами дополнительных зон повышенной трещиноватости и, соответственно, путей миграции.

Условия образования залежей УВ в Таначи-Моктаконской ЗНГН определили особенности сформировавшихся в ней скоплений. Уникальность состоит в том, что в пробе конденсата из скважины 2 Таначинской газоконденсатной залежи с глубины 1880 м получен флюид, на 49.3 мас. % состоящий из ароматических УВ (в том числе 83 % – низкокипящие

соединения) при высокой плотности флюида  $-834.0 \text{ кг/м}^3$  [4]. Это объясняется воздействием магматических интрузий [5] — считают, что движение магмы и ее последующее извержение могут оказать сильное влияние на углеводородные системы осадочных бассейнов.

В результате активных процессов палеоразгрузки пластовых флюидов на трапповом, гидротермальном и неотектоническом этапах истории осадочного бассейна Курейской синеклизы могло происходить масштабное разрушение и переформирование первичных залежей углеводородов. Это подтверждают многочисленные выходы битумов, мальт, асфальтитов по всему разрезу осадочного чехла от нижнего палеозоя до триаса.

В связи с этим принципиальное значение имеет повсеместное распространение (сверхгидростатический высоких И аномально высоких пластовых давлений гидродинамический режим) в подсолевых карбонатных горизонтах венд-нижнекембрийского комплекса. Формирование такого упругого гидродинамического режима обусловлено, в первую очередь, пластичностью перекрывающей соленосной толщи нижнего и среднего В результате в этом интервале разреза сформирован региональный гидродинамический барьер, который разделяет флюидные системы подсолевых рифейвендских отложений и надсоленосную толщу с ее обстановкой активного водообмена. Гидродинамический барьер соленосных отложений служит важным фактором сохранности залежей УВ в коллекторах подсолевых отложений венда и рифея практически всех известных зон нефтегазонакопления в западной части Сибирской платформы. Аналогично учет влияния этого фактора также повышает перспективы нефтегазоносности внешней зоны южного и юго-восточного борта Курейской синеклизы.

Формирование современных систем АВПД в коллекторских горизонтах Курейской синеклизы связано с вертикально-миграционными и, вероятно, эндогенно-энергетическими процессами. В связи с этим картирование АВПД может рассматриваться как косвенный критерий нефтегазоносности площадей [6].

- 1. Сурнин А.И., Литвинова И.В. Современное представление структуры гидродинамического поля осадочного чехла Лено-Тунгусской провинции Сибирской платформы // Современная гидрогеология нефти и газа. Фундаментальные и прикладные вопросы: Материалы Всерос. научной конференции, посвящ. 85-летию А.А. Карцева. М.: ГЕОС, 2010. С. 224–230.
- 2. Дюнин В.И. Гидрогеодинамика глубоких горизонтов нефтегазоносных бассейнов. М.: Научный мир, 2000. 472 с.
- 3. Славин В.И., Брук Л.М. Основные гипотезы происхождения АВПД и их классификация // Изучение геологического разреза и прогнозирование АВПД: сборник науч. Трудов. Л., ВНИГРИ, 1987. С. 145.
- 4. Битнер А.К., Безбородов Ю.Н., Прокатень Е.В., Орловская Н.Ф. Таначи-Моктаконская зона нефтегазонакопления потенциальный объект совмещения добычи и переработки // Известия Томского политехнического университете, Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, №10. С. 197–208.
- 5. Schofield N., Holford S. Impact of Volcanic and Igneous Rocks on hydrocarbon Exploration // AAPG/SEG International Conferenceand Exhibition. London, England, October 15–18, 2017. 1 p. 3.
- 6. Сурнин А.И., Литвинова И.В. Гидродинамический контроль нефтегазонакопления на Сибирской платформе // Фундаментальные и прикладные вопросы гидрогеологии нефтегазоносных бассейнов. Труды ИПНГ РАН. Сер.конференции. М., 2015. Вып. 1. С. 104–107.

# МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-350-354

Наливайко Н.Г. $^{1}$ , Гостева И.А. $^{1}$ , Новиков Д.А. $^{2}$ , Черных А.В. $^{2}$ 

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, unpc\_voda@mail.ru

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В исследуемых водах всех месторождений наблюдается присутствие микроорганизмов, участвующих в круговороте азота, серы, железа и углерода. В отношении коррозионной активности бактерий следует отметить, что, если не проводить постоянное наблюдение за скважинами в отношении микрофлоры, особенно нитрифицирующими и сульфатвосстанавливающими, могут проявиться отрицательные процессы, обусловленные размножением отмеченных групп бактерий. Отрицательные процессы могут проявляться в виде ржавых участков и каверн на металлическом оборудовании, образованием в трубопроводной системе биопленок, затрудняющих скорость движения воды, что приводит к ухудшению ее качества (появление неприятного запаха, привкуса, увеличение мутности), изменению химического состава и выходу из строя оборудования.

**Ключевые слова:** гидрогеохимия, микробиология, разработка нефтяных месторождений, Западная Сибирь.

**Abstract**. In the studied waters of all oilfield, the presence of microorganisms participating in the cycle of nitrogen, sulfur, iron and carbon is observed. With respect to the corrosion activity of bacteria, it should be stressed that in the case if permanent observation of the wells focusing on microflora, especially nitrifying and sulfate-reducing bacteria, is not carried out, negative processes due to the propagation of the mentioned bacteria groups may manifest themselves. The negative processes may be pronounced as the appearance of rusty regions and caverns on the surface of metal equipment, the formation of biofilms in pipeline systems which would hinder water flow and this worsen its quality (the appearance of unpleasant smell, taste, an increase in turbidity), changes in chemical composition, and failure of equipment.

Key words: hydrogeochemistry, microbiology, development of petroleum deposits, West Siberia.

Разработка месторождений углеводородов сопряжена с большими экологическими рисками. В первую очередь это связано с аварийными ситуациями при порывах нефтепроводов и утечках из технологического оборудования. Наиболее чувствительно на протекающие процессы в окружающей среде откликается микрофлора природных вод. В процессе своего развития бактерии используют питательные вещества, которые, с одной стороны, служат источником энергии, а с другой — дают материал для построения клетки. Питательными веществами могут быть практически все органические соединения (жиры, протеины, углеводы, липиды, целлюлоза, хитин, углеводороды и др.), а также минеральные вещества, вода и газы [1, 2].

В этой связи в настоящей работе представлены первые результаты изучения микробиологического состава природных вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области. Полевые работы по изучению особенностей геохимии подземных вод различного изотопно-геохимического облика (41 проба) проводились в полевые сезоны 2018–2021 гг. Лабораторное изучение химического и микробиологического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Микробиологический анализ (7 проб) производили после отбора проб без стадии хранения. Для выявления микроорганизмов использовали жидкие и твердые элективные питательные среды. Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты (15 проб) проводилось в Аналитическом центре МИИ Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

В настоящее время на территории Новосибирской области в разработке находятся три нефтяных месторождения: Верх-Тарское, Восточно-Тарское и Малоичское. На Верх-Тарском и Восточно-Тарском месторождениях (интервалы 2684–2703.5 м и 2753–2758 м

соответственно, минерализация вод от 21.7 до 48.0 г/дм<sup>3</sup>) эксплуатируются залежи горизонта  $\mathrm{HO_{1}}$  верхнеюрского возраста, а на Малоичском (интервал 3263.5 –3275 м, минерализация вод от 58.0 до 71.1 г/дм<sup>3</sup>) — внутрипалеозойская залежь. Также на Верх-Тарском промысле в разработке находится залежь горизонта НГГЗК (по Е.Е. Даненбергу и А.Э. Конторовичу — зона контакта отложений палеозоя и мезозоя или разновозрастный нефтегазоносный горизонт зоны контакта [3, 4]).

Горизонт  $\Theta_1$  оксфордского регионального резервуара является основным продуктивным пластом и объектом разработки в исследуемом районе. Залежи разрабатываемых месторождений к настоящему времени практически полностью разбурены сеткой эксплуатационных скважин. Так, общий фонд скважин залежи пластов  $\Theta_1^{-1}$  и  $\Theta_1^{-2}$  Верх-Тарского нефтяного месторождения по состоянию на январь 2019 г. составляет 175 единиц, из них 134 действующих [5]. По состоянию на 01.01.2018 г. ее запасы нефти составляют: по категориям  $A+B_1$  (геологические/извлекаемые) — 39.980/10.898 млн т, по категории  $B_2-1.180/0.489$  млн т [6]. Последние результаты детальных геотермических, гидродинамических и гидрогеохимических исследований нефтегазоносных отложений изучаемого региона отражены в работах [7–11].

При этом отметим, что пластовые воды разрабатываемых нефтяных залежей относятся к нейтральным с величиной pH, изменяющейся в интервале от 6.9 до 7.4; характеризуются Сl Na составом с величиной общей минерализации от 21.7 до 71.1 г/дм³ и содержанием (мг/дм³): Si (13.0–22.4), NH<sub>4</sub> (29.8–86.0), I (5.7–14.0), Br (53.4–178.0), В (11.3–22.4) и Sr (153.9–396.4). Выявлена широкая вариация изотопных отношений  $\delta$ D (от –77.9 до –61.7 %) и  $\delta$ <sup>18</sup>O (от –9.0 до –5.1 %) вод, которые расположены значительно ниже GMWL. Изотопные отношения  $\delta$ <sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> исследованных вод варьируются в диапазоне от –21.6 до –1.4 %. Отношение Sr<sup>87</sup>/Sr<sup>86</sup> изученных проб находится значительно ниже, чем в современных морских водах и составляет в среднем у подземных вод меловых отложений 0.70630, юрских – 0.70645 и палеозойских – 0.70696. За счет процессов смешения все воды разрабатываемых залежей схожи по изотопным отношениям  $\delta$ D –  $\delta$ <sup>18</sup>O,  $\delta$ <sup>13</sup>C –  $\delta$ <sup>18</sup>O,  $\delta$ <sup>7</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr –  $\delta$ <sup>18</sup>O,  $\delta$ <sup>7</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr –  $\delta$ <sup>18</sup>O и <sup>87</sup>Sr<sup>86</sup>/Sr – <sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr. Они находятся в одной области с водами апт-альб-сеноманского водоносного комплекса, которые изначально выступали в качестве агента заводнения и поступали в систему поддержания пластового давления [12].

В таблице представлены бактерии, характерные для подземных природных вод. Наибольшей распространенностью отличаются сапрофиты. В то же время количество этих микробов в большинстве проб воды незначительно и составляет первые десятки клеток. Функциональная роль при таком количестве практически отсутствует. Сапрофиты для процессов своей жизнедеятельности используют преимущественно белковую органику. Конечным продуктом их метаболизма являются различные органические кислоты, а также аммиак и углекислота [13]. Применительно к данной ситуации из-за малой численности сапрофиты в большинстве изученных водных объектов не могут оказать какого-либо влияния, ни на нефть, ни на химический состав вод. Более значительна роль сапрофитов в качестве индикаторов экологического состояния водных объектов. Так, в воде скважины 115 Малоичского месторождении нефти (на водоводе) количество сапрофитов составляет 1630 КОЕ/дм³. Это позволяет характеризовать воду скважины как «грязную». В воде водозаборной скважины 94/4 Малоичского месторождения обнаружено более 11 тысяч клеток в 1 дм³ воды сапрофитных бактерий [14]. Соответственно ухудшается экологический статус воды этой скважины: вода характеризуется как «очень грязная».

Олиготрофы как показатели степени минерализации органического вещества в существенном количестве присутствуют только в воде заборной скважины 94/4 Малоичского месторождения — 5900 КОЕ/дм<sup>3</sup>. В воде всех изученных скважин количество олиготрофов значительно ниже количества сапрофитов, соответственно индекс олиготрофности весьма низкий. Из этого следует, что процессы самоочищения воды в данный момент в изученных скважинах отсутствуют. По данным Л.Е. Крамаренко [14], количественное соотношение сапрофитных и олиготрофных микроорганизмов дает показатель индекса олиготрофности.

Значение индекса >1 указывает на активно идущие процессы самоочищения в экосистеме. Если индекс <1, то процесс самоочищения отсутствует и происходит загрязнение вод органическим веществом.

Характеристика микробиологического состава подземных вод разрабатываемых нефтяных месторождений (2021 г.)

Mecro	орождений (2021 г.)	1						
		Количество микроорганизмов, КОЕ/дм <sup>3</sup>						
№ п/п	Место отбора	Гетеротрофные группы бактерий						Авто- трофные группы бактерий
		Аэробн	Аэроб- ные					
		Сапро- фиты (ОМЧ)	Олиго- трофы	ИО	аж	Нефтеоки- сляющие	СВБ (баллы)	Нитри- фициру- ющие
1	Верх-Тарское нефтяное месторождение, подтоварная вода, центральный пункт сбора нефти, на насосе	30	70	2.3	0	0	10° (15)	105
2	Верх-Тарское нефтяное месторождение, скв. 327	340	0	0	0	240	10 <sup>3</sup> (9)	101
3	Верх-Тарское нефтяное месторождение, водозабор, скв. №3	30	0	0	0	110	0 (0)	105
4	Восточно-Тарское нефтяное месторождение, скв. 1В	20	0	0	2600	700	0 (0)	105
5	Малоичское нефтяное месторождение, скв. 115, на водоводе	1630	30	0.02	0	0	104 (11)	_
6	Малоичское нефтяное месторождение, установка подготовки нефти, на насосе	40	0	0	0	110	10 <sup>0</sup> (15)	105
7	Малоичское нефтяное месторождение, водозаборная скв. 94/4	11500	5900	0.51	130	3000	10 <sup>3</sup> (11)	105

Примечание. ИО – индекс олиготрофности; ЖБ – железоокисляющие бактерии; СВБ – сульфатвосстанавливающие бактерии.

К настоящему времени в воде скважин не обнаружены аммонифицирующие и денитрифицирующие бактерии. Возможно, они появятся по истечении срока инкубации. Нефтеокисляющие микроорганизмы, учитывая их территориальную принадлежность к нефтяным месторождениям, можно рассматривать в качестве аборигенной микрофлоры. С этой позиции их количество в воде изученных скважин весьма незначительное, за исключением скважины 94/4. Такая ситуация может быть обусловлена отсутствием

доступных источников питания углеводородного характера, в том числе и нефти; скорее всего, загрязнение нефтепродуктами отсутствует.

В изученных объектах преобладающими, и количественно и по встречаемости, являются нитрифицирующие микроорганизмы. Нитрифицирующие бактерии превращают аммиак в нитраты. Это существенный момент, так как вода приобретает коррозионную способность, обусловленную микроорганизмами.

Коррозионные свойства подземных вод изученных скважин активируются за счет сульфатвосстанавливающих бактерий. Их количество невелико, но их свойства позволяют им обозначать свою роль в пространстве за счет создания анаэробных условий и сероводорода. Эти бактерии весьма приспособляемы, проявляют устойчивость к бактерицидам. Присутствующие в воде даже нескольких десятков клеток могут за короткий промежуток времени превратиться в сотни тысяч. Одним из опасных свойств сульфатвосстанавливающих бактерий является ИХ феноменальная способность образованию биопленок (оброста) [15–17]. Во избежание такой ситуации необходимо постоянное наблюдение как за количеством сульфатвосстанавливающих бактерий, так и за их активностью.

Таким образом, исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы. В исследуемых водах всех месторождений наблюдается присутствие микроорганизмов, участвующих в круговороте азота, серы, железа и углерода. Их жизнедеятельность указывает на вероятность развития коррозионных процессов в водопроводящих системах. Негативные действия могут проявляться в виде ржавых участков и каверн на металлическом оборудовании, биопленок, затрудняющих скорость движения воды, что приводит к ухудшению ее качества (появление неприятного запаха, привкуса, увеличение мутности), изменению ее химического состава и выходу из строя оборудования.

Исследование выполнено при поддержке проекта  $\Phi$ HИ № 0331-2019-0025,  $P\Phi$ ФИ и Правительства Новосибирской области в рамках гранта № 19-45-540006 и Государственного задания  $P\Phi$  «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

- 1. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. М.: Недра, 1996. 423 с.
- 2. Гусев М.В., Минеева Л.А. Общая микробиология. М.: МГУ, 1973. 376 с
- 3. Биджаков В.И., Даненберг Е.Е., Иванов И.А., Тищенко Г.И. Нефтегазоносность верхней части палеозоя юго-востока Западно-Сибирской плиты // Нефтегазоносность Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск: СО РАН, 1981. С. 116–121.
- 4. Конторович А.Э., Иванов И.А., Ковешников А.Е., Краснов В.И., Перозио Г.Н. Геологические условия нефтегазоносности верхней части палеозойского разреза Западной Сибири (на примере Межовского срединного массива) // Теоретические и региональные проблемы геологии нефти и газа. Новосибирск: СО РАН, 1991. С. 152–171.
- 5. Novikov D.A., Pavlova S.A., Yu Kuznetsov D., Ryzhkova S.V., Chernikov A.A. Contemporary development state of reservoir Yu1, the Verkh-Tarskoe oilfield (south of Western Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1451(1). 012008.
- 6. Месторождения (разрабатываемые). URL: https://www.novng.ru/production/deposits/ (дата обращения 10.08.2020).
- 7. Новиков Д.А., Рыжкова С.В., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. О геотермической зональности нефтегазоносных отложений северо-западных районов Новосибирской области // Известия вузов. Нефть и газ. 2018. № 5. С. 69–76.
- 8. Новиков Д.А., Рыжкова С.В., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В., Сесь К.В., Ефимцев Н.А., Шохин А.Е. Нефтегазовая гидрогеохимия доюрских комплексов южных районов Обь-Иртышского междуречья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329, № 12. С. 39–54.
- 9. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В., Рыжкова С.В. Гидродинамические особенности нефтегазоносных отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья // Георесурсы. 2019. Т. 21. № 4. С. 85–94.
- 10. Новиков Д.А., Шохин А.Е., Черников А.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Геохимия водорастворенных газов нефтегазоносных отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья  $\frac{1}{2}$  Известия вузов. Нефть и газ. 2019. № 4 (136). С. 70–81.

- 11. Садыкова Я.В., Фомин М.А., Рыжкова С.В., Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. Прогноз нефтегазоносности юрских и палеозойских отложений южных районов Западно-Сибирского бассейна // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 9. С. 114–127.
- 12. Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Рыжкова С.В. Первые данные по изотопному составу пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 2. С. 59-72.
- 13. Крамаренко Л.Е. Геохимическое и поисковое значение микроорганизмов подземных вод. Л.: «Недра», 1983.179 с.
- 14. Крамаренко Л.Е. Микроорганизмы подземных вод и их геохимическое значение. Труды ВСЕГЕИ. 1975. 241 с.
  - 15. Заварзин Г.А. Литотрофные микроорганизмы. М.: Наука, 1972. 323 с.
- 16. Соколова Д.Ш., Семенова Е.М., Груздев Д.С., Ершов А.П., Биджиева С.Х., Иванова А.Е., Бабич Т.Л., Сисенбаева М.Р., Бисенова М.А., Назин Т.Н. Микробное разнообразие и потенциальные продуценты сероводорода в нефтяном месторождении Каражанбас (Казахстан) // Микробиология. 2020. Т. 89, № 4. С. 462—473.
- 17. Панова И.А., Русанов И.И., Кадников В.В., Латыголец Е.А., Авакян М.Р., Иванов М.В., Зюсман В.С., Ковалева А.А., Равин Н.В., Пименов Н.В., Карначук О.В. Сульфатредукция в подземных горизонтах затопленной угольной шахты в Кузбассе // Микробиология. 2020. Т. 89, № 5. С. 547–555.

# ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗОТОПНО-ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕОКОМСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-УРЕНГОЙСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-355-359

Новиков Д.А. $^1$ , Пыряев А.Н. $^2$ , Дульцев Ф.Ф. $^1$ , Черных А.В. $^1$ , Туровская Е.М. $^3$   $^1$ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, novikovda@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, pyrayev@igm.nsc.ru

<sup>3</sup>3AO «Нортгаз», Новый Уренгой, e.turovskaya@northgas.ru

Аннотация. Приводятся первые результаты комплексных исследований подземных вод неокомских отложений Северо-Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (арктический сектор Западной Сибири). Установлены значительные различия в изотопно-геохимическом облике подземных вод двух куполов месторождения, что указывает на различный механизм формирования их состава. В первом воды имеют преимущественно  $HCO_3$ -Cl Na, Cl- $HCO_3$  Na состав с величиной общей минерализации 195-5118 мг/дм³, во втором – Cl Na с минерализацией от 3054 до 13124 мг/дм³. На основании значений  $\delta D$  (от -99.9 до -55.9 %) и  $\delta^{18}O$  (от -9.0 до -6.2 %) сделан вывод о седиментогенном происхождении исследованных вод. Полученные значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  указывают на разную природу формирования водорастворенной формы углерода для отдельных куполов: изотопный обмен углеродом с карбонатными породами в первом случае, распад и бактериальное преобразование органического вещества – во втором.

**Ключевые слова:** гидрогеохимия, стабильные изотопы, генезис подземных вод, Северо-Уренгойское нефтегазоконденсатное месторождение, Арктика.

Abstract. The first results of the integrated studies of groundwaters of the Neocomian sediments in the North-Urengoy oil and gas condensate deposit (the Arctic sector of West Siberia) are reported. Substantial differences in the isotope-geochemical appearance of groundwaters in the two field domes were revealed, which points to different mechanisms of the formation of their composition. In one of them, water composition is mainly HCO<sub>3</sub>-Cl Na, Cl-HCO<sub>3</sub> Na with TDS 195–5118 mg/L, and in the other – Cl Na with TDS from 3054 to 13124 mg/L. Relying on the values of  $\delta$ D (from –99.9 to –55.9 ‰) and  $\delta$ <sup>18</sup>O (from –9.0 to –6.2 ‰), it was concluded that the origin of the studied waters is sedimentogenous. The obtained  $\delta$ <sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> values point to different types of the formation of water-dissolved carbon forms for the domes: isotope carbon exchange with carbonate rocks in the former case, decay and bacterial transformation of the organic matter in the latter.

**Key words:** hydrogeochemistry, stable isotopes, groundwater genesis, North Urengoy oil and gas condensate deposit, the Arctic.

Очевидно, что будущие открытия крупных и уникальных залежей углеводородов (УВ) на территории Западной Сибири следует связывать с ее арктическим сектором, включая шельф Карского моря. С 60-х по 80-е годы XX столетия были открыты уникальные газовые месторождения: Заполярное (1965), Уренгойское (1966), Медвежье (1967), Ямбургское (1969) и другие. До Западной Сибири мир не знал подобных газовых гигантов [1]. В настоящее время гидрогеологическим исследованиям при поисковых работах уделяется недостаточно внимания, несмотря на их высокую информативность в распознавании пустых и промышленно нефтегазоносных объектов [2, 3]. Особенности региональной гидрогеологии нефтегазоносных отложений изучаемой территории рассмотрены нами ранее [4–6].

Северо-Уренгойское месторождение расположено в пределах северных районов Надым-Тазовского междуречья (рис. 1). В настоящей работе представлены первые данные по комплексным изотопно-гидрогеохимическим исследованиям 16 проб, отобранных во время полевых работ 2019–2020 гг. Изученные пласты приурочены к двум куполам на месторождении и имеют готерив-валанжинский возраст. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты проводилось в Аналитическом центре МИИ Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Изученные воды первого купола относятся к гидрокарбонатно-хлоридному натриевому, хлоридно-гидрокарбонатному натриевому и гидрокарбонатно-хлоридному натриево-кальциевому типам (по классификации С.А. Щукарева). Величина их общей минерализации варьируется в широких пределах — от 195 до 5118 мг/дм³, рН — от 6.92 до 7.98. Подземные воды второго купола имеют хлоридный натриевый состав с более высокой величиной общей минерализации — от 3054 до 13124 мг/дм³ и меньшими значениями рН — от 6.65 до 7.32. Разделение имеющихся данных на однородные совокупности было выполнено с помощью геохимических коэффициентов (Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, Ca/Na, Ca/Mg, rNa/rCl и SO4/Cl) и генетических коэффициентов (Cl/Br, B/Br и Ca/Cl), что позволило предварительно выделить три группы вод: конденсатогенные, смешанные и литогенные (рис. 1,  $\delta$ – $\delta$ ).

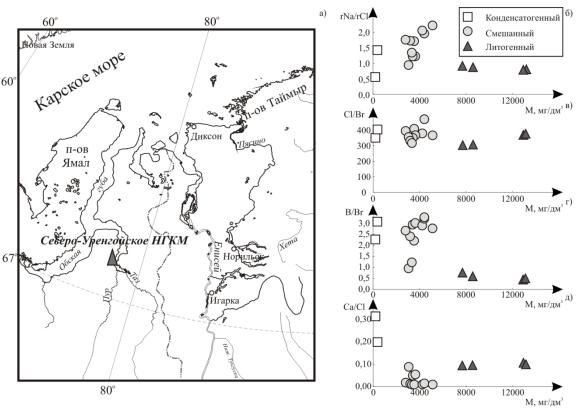


Рис. 1. Местоположение Северо-Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (a); геохимическая типизация подземных вод неокомского водоносного комплекса по коэффициентам rNa/rCl ( $\delta$ ), Cl/Br ( $\epsilon$ ), B/Br ( $\epsilon$ ) и Ca/Cl ( $\delta$ ).

Первая группа характеризуется  $HCO_3$ -Cl Na составом с величиной общей минерализации  $195-377~\rm Mr/дм^3$ , что отвечает умеренно пресным водам с нейтральными pH (6.9–7.2). Средние отношения коэффициентов составляют: Ca/Si 8.6; Mg/Si 0.09; Na/Si 21.6; Mg/Na 0.005; Si/Na 0.057; Ca/Na 0.540; Ca/Mg 98.3; rNa/rCl 0.99; SO<sub>4</sub>/Cl 0.047; Cl/Br 378; Ca/Cl 0.25; B/Br 2.67. Ко второй группе относятся воды  $HCO_3$ -Cl Na, Cl- $HCO_3$  Na и Cl Na состава с величиной общей минерализации, варьирующейся от 2797 до 5118 мг/дм<sup>3</sup>. Воды нейтральные и слабощелочные (pH 6.6 – 8,0). Средние отношения коэффициентов: Ca/Si 5.9; Mg/Si 0.10; Na/Si 89.9; Mg/Na 0.001; Si/Na 0.014; Ca/Na 0.034; Ca/Mg 29.7; rNa/rCl 1.62; SO<sub>4</sub>/Cl 0.019; Cl/Br 374; Ca/Cl 0.03; B/Br 2.43. Третья группа объединяет в себе воды Cl Na состава с величиной общей минерализации 7688–13124 мг/дм<sup>3</sup>. Воды данной группы нейтральные (pH 6.9–7.0). Средние отношения коэффициентов: Ca/Si 49.0; Mg/Si 0.53; Na/Si 260.5; Mg/Na 0.002; Si/Na 0.004; Ca/Na 0.18; Ca/Mg 100.9; rNa/rCl 0.83; SO<sub>4</sub>/Cl 0.001; Cl/Br 332; Ca/Cl 0.10; B/Br 0.57. По геохимическим коэффициентам следует отметить, что водовмещающие алюмосиликатные породы содержат повышенные концентрации натрия и кальпия.

В подземных водах первого купола наиболее высокие содержания (мг/дм³) установлены у I (до 12.6), В (до 8.31), Sr (до 4.4), Вr (до 4.08) и Ва (до 1.59). В водах второго купола высокие концентрации отмечаются у того же набора микрокомпонентов (мг/дм³): I (до 102.08), Sr (до 88.12), Вr (до 21.74), Ва (до 18.59) и В (до 12). При этом средние содержания ряда химических элементов в водах второго купола значительно больше, чем в первом (раз): по Sr - 1.6; Br - 5.8; Ba - 7.6; I - 13.8 и т.д.

На рисунке 2, a и в таблице представлены данные по концентрациям дейтерия и кислорода в исследованных водах. Значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  составляют от -99.9 до -55.9 ‰ и от -9.0 до -6.2 ‰ соответственно. Несмотря на близкий диапазон концентраций кислорода-18, содержание дейтерия в водах двух исследованных куполов существенно различается, что говорит о независимости их гидродинамических систем.

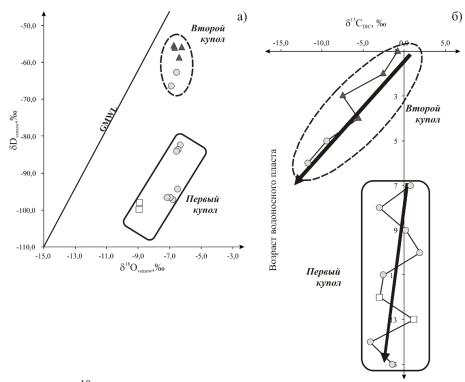


Рис. 2. Значения  $\delta$ D и  $\delta^{18}$ O относительно GMWL (*a*) и концентрация углерода <sup>13</sup>C в DIC (*б*) для вод куполов 1 и 2 Северо-Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения. Цифрами на рис. 2, *б* показан условный возраст пород от молодых к более древним.

Видно, что для всех изученных вод наблюдается существенное положительное отклонение значений  $\delta^{18}$ O от GMWL [7] (кислородный сдвиг), характерное для термальных вод [8, 9]. Обогащение изотопом  $^{18}$ O достигает 6.6 ‰ для вод первого купола и 2.7 ‰ – для второго. В литературе [10–14] кислородный сдвиг значений  $\delta^{18}$ O объясняют двумя основными факторами: эффектом испарения вод, характерным для поверхностных водоемов и изотопным обменом кислорода вод с окружающими кислородсодержащими породами, обогащенными изотопом  $^{18}$ O, характерным для подземных. Проявление второго фактора определяется большим набором критериев [8, 10] и в существенной степени характерно при длительном времени изотопного обмена, высоких температурах (200 °C и выше), большом количестве кислородсодержащих минералов в породе, доступных для изотопного обмена в текущих условиях [8, 9] и др. Учитывая невысокие температуры исследованных вод (от 72 до 87 °C), такие большие величины кислородных сдвигов, по-видимому, можно объяснить сочетанием комплекса факторов: исходным обеднением поверхностных вод до захоронения легким изотопом  $^{16}$ O за счет испарения, последующим захоронением вод и их постепенным изотопным обменом кислородом с окружающими породами.

Большее значение кислородного сдвига для вод первого купола может быть связано с более благоприятными условиями для изотопного обмена кислородом в этой системе. Действительно, для него характерны бо́льшие температуры (85 против 75 °C), бо́льший возраст водоносных пластов (соответственно, при условии сингенетичности захоронения вод и вмещающих пород, бо́льшая длительность кислородного изотопного обмена). Вопрос о содержании кислородсодержащих водовмещающих пород и их доступности для обмена с водами в отдельных куполах на текущий момент остается открытым и требует дополнительных литолого-минералогических исследований. Полученные значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  исследованных вод указывают на их седиментационное происхождение и длительный изотопный обмен кислородом в системе «вода — порода».

Изотопно-геохимические особенности подземных вод неокомского водоносного комплекса

Северо-Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения

					, ,		1 / 1			
№ п/п	Купол	М, мг/дм <sup>3</sup>	rNa/rCl	Cl/Br	B/Br	Ca/Cl	$\delta^{13}C_{DIC}$ , ‰	δD, ‰	δ <sup>18</sup> O, ‰	Содержание DIC, µмоль/л
1	1	5118	2.23	367	2.77	0.010	0.2	-82.4	-6.4	38587
2	1	4234	2.07	379	2.90	0.010	1.9	-84.0	-6.6	30007
3	1	3533	1.72	409	2.21	0.010	-1.4	-94.4	-6.5	21005
4	1	3339	1.35	317	1.23	0.009	0.7	-96.6	-7.2	14100
5	1	4405	1.97	470	3.21	0.015	-2.6	-83.8	-6.5	30400
6	1	195	0.56	351	2.27	0.314	-3.0	-98.0	-8.9	1925
7	1	3189	1.74	332	2.41	0.012	-3.0	-96.4	-7.0	20497
8	1	2797	1.77	395	2.67	0.018	-4.2	-97.1	-6.8	18103
9	1	377	1.43	404	3.07	0.199	1.1	-99.9	-9.0	3280
10	2	8601	0.83	298	0.58	0.095	-7.5	-56.0	-6.2	3497
11	2	7688	0.87	303	0.77	0.095	-5.6	-58.8	-6.4	6914
12	2	3409	1.23	351	2.94	0.049	-9.4	-62.8	-6.5	12633
13	2	3633	1.23	367	3.01	0.055	-11.7	-66.6	-6.9	14023
14	2	12928	0.80	360	0.44	0.106	-2.6	-55.9	-6.7	1520
15	2	13124	0.81	368	0.49	0.100	-0.8	-56.3	-6.7	1415
16	2	3054	0.95	356	0.95	0.089	_		_	

Значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  в исследованных водах (таблица) варьируются в широком диапазоне - от -11.7 до +1.9 ‰, при содержании DIC по сумме трех компонентов ( $CO_{2aq}$ ,  $HCO_{3}^{-}$  и  $CO_{3}^{2-}$ ) от 1415 до 38587 µмоль/л. Концентрация углерода <sup>13</sup>С в изученных водах изменяется по мере увеличения возраста пластов по-разному (рис. 2 б): для вод первого купола величина  $\delta^{13}$ C<sub>DIC</sub> варьируется в довольно узком диапазоне, наблюдается небольшое снижение концентрации изотопа <sup>13</sup>С (примерно 6 ‰), в то время как для вод второго купола отрицательный сдвиг значений  $\delta^{13}C_{DIC}$  носит более выраженный характер и разница достигает 11.7 ‰. Формирование DIC подземных вод – сложный процесс, включающий в себя множество пересекающихся и конкурирующих реакций, приводящих как к обогащению, так и к обеднению водорастворенного углерода тяжелым изотопом <sup>13</sup>С. Важное место в нем занимают как «неорганические» источники (мантийная дегазация, растворение и метаморфизм карбонатных пород) [10, 15], так и бактериальная активность (сульфатредукция. метаногенез. сульфат-метановые переходы) Γ10. 16–19]. Еше немаловажным фактором является количественное соотношение компонентов DIC (CO<sub>2aa</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>), поскольку значение коэффициента фракционирования углерода при переходе в разные водорастворимые формы существенно отличается [20]. Полученные значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  для вод перового купола, по-видимому, указывают на длительный изотопный обмен углеродом DIC с карбонатными породами при их растворении [10, 11]. Несмотря на отсутствие карбонатных пород непосредственно в целевом интервале глубин, хорошо известно о залегании палеозойского комплекса карбонатсодержащих пород на существенно больших глубинах. Соответственно в этом случае вероятным представляется изотопный обмен кислорода вод и углерода DIC на более глубоких горизонтах и их последующий перенос по зонам разломов в изучаемый интервал. Это дополнительно подтверждает гипотезу длительного изотопного обмена кислородом вод с вмещающими карбонатными породами, приводящего к обогащению вод тяжелым изотопом <sup>18</sup>О, что отмечалось ранее. Для вод второго купола, по-видимому, доступность карбонатного материала для изотопного обмена существенно меньше, чем в первом куполе, и в данном случае изотопный состав углерода DIC определяется в большей степени процессами окисления и бактериального преобразования органического вещества, богатого легким изотопом <sup>12</sup>С.

Исследования проводились при поддержке проекта  $\Phi$ HИ № 0331-2019-0025 и  $P\Phi\Phi$ И в рамках научного проекта № 18-05-70074 «Ресурсы Арктики».

- 1. Конторович А.Э. Пути освоения ресурсов нефти и газа Российского сектора Арктики // Вестник РАН. 2015. Т. 85, № 5-6. С. 420–430.
- 2. Зорькин Л.М., Суббота М.И., Стадник Е.В. Нефтегазопоисковая гидрогеология. М.: Недра, 1982. 216 с.
  - 3. Карцев А.А. Теоретические основы нефтегазовой гидрогеологии. М.: Недра, 1992. 320 с.
- 4. Шварцев С.Л., Новиков Д.А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 8. С. 1008–1020.
- 5. Новиков Д.А. Роль элизионного водообмена в формировании гидродинамического поля Ямало-Карской депрессии // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 3. С. 248–261.
- 6. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development. 2017. V. 44, № 5. P. 780–788.
  - 7. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. V. 133. P. 1702–1703.
  - 8. Nickolson K. Geothermal Fluids. Chemistry and Exploration Techniques. Berlin: Springer, 1993. 263 p.
- 9. Aydin H., Karakuş H., Mutlu H. Hydrogeochemistry of geothermal waters in eastern Turkey: Geochemical and isotopic constraints on water-rock interaction // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2020. V. 390. 106708.
  - 10. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.
- 11. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 8th edition. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. 460 p.
- 12. Chafouq D., Mandour A.El, Elgettafi M., Himi M., Chouikri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) // Journal of African Earth Sciences. 2018. V. 139. P. 1–13.
- 13. Newman C.P. Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. 2020. V. 210. 106445.
- 14. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soilvegetation-atmosphere system: Stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration // Physics and Chemistry of the Earth. 2010. V. 35. P. 565–570.
- 15. Alçiçek H., Bülbül A., Yavuzer I., Alçiçek M.C. Origin and evolution of the thermal waters from the Pamukkale Geothermal Field (Denizli Basin, SW Anatolia, Turkey): Insights from hydrogeochemistry and geothermometry // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2019. V. 372. P. 48–70.
- 16. Conrad R. Klose M., Yuan Q., Lu Y., Chidthaisong A. Stable carbon isotope fractionation, carbon flux partitioning and priming effects in anoxic soils during methanogenic degradation of straw and soil organic matter // Soil Biology and Biochemistry. 2012. V. 49. P. 193–199.
- 17. Meister P., Liu B., Khalili A., Böttcher M.E., Jørgensen B.B. Factors controlling the carbon isotope composition of dissolved inorganic carbon and methane in marine porewater: An evaluation by reactiontransport modelling // Journal of Marine Systems. 2019. V. 200. 103227.
- 18. Pohlman J.W., Ruppel C., Hutchinson D.R., Downer R., Coffin R.B. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico // Marine and Petroleum Geology. 2008. V. 25. P. 942–951.
- 19. Londry K.L., Dawson K.G., Grover H.D., Summons R.E., Bradley A.S. Stable carbon isotope fractionation between substrates and products of Methanosarcina barkeri // Organic Geochemistry. 2008. V. 39. P. 608–621.
- 20. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO<sub>2</sub> // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59, Issue 1. P. 107–114.

## МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО ОСАДОЧНОГО БАССЕЙНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-360-364

Плавник А.Г. <sup>1,2</sup>, Курчиков А.Р. <sup>1,2</sup>, Ицкович М.В. <sup>1,2</sup>, Астафьев В.П. <sup>1</sup> <sup>1</sup>Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Тюмень, plavnikag@ipgg.sbras.ru <sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень

Аннотация. В работе представлены результаты расчета трехмерной гидрохимической модели юрскомеловых отложений Западно-Сибирского мегабассейна в виде карт изменения гидрохимических параметров по отдельным свитам и серии разрезов. Расчеты выполнены на разработанном программном модуле трехмерного моделирования, обеспечивающем эффективную обработку больших объемов гидрогеохимической информации и автоматизированных вычислений с заданными модельными условиями для комплекса водорастворенных компонентов. В основу модуля заложен метод, основанный на предварительном расчете условно-двумерных профилей и учитывающий структурно-литологическую неоднородность отложений. Преимуществом модуля является возможность внесения различных модельных условий при расчете трехмерных моделей и его доработки под различные задачи. На основе используемого метода приводятся результаты построения модели с учетом блокового строения территории, с возможностью реализации этих построений в программном модуле.

**Ключевые слова:** подземные воды, трехмерная модель, карты, разрезы, Западно-Сибирский мегабассейн.

Abstract. The paper presents the results of calculating a three-dimensional hydrochemical model of the Jurassic-Cretaceous deposits of the West Siberian megabasin in the form of maps of changes in hydrochemical parameters for individual formations and a series of sections. The calculations were carried out using the developed software module for three-dimensional modeling, which provides efficient processing of large volumes of hydrogeochemical information and automated calculations with specified model conditions for a complex of water-dissolved components. The module is based on a method based on a preliminary calculation of conditionally two-dimensional profiles and taking into account the structural and lithological heterogeneity of deposits. The advantage of the module is the ability to introduce different model conditions when calculating three-dimensional models and its refinement for various tasks. Based on the method used, the results of constructing a model are given taking into account the block structure of the territory, with the possibility of implementing these constructions in a software module.

Key words: groundwater, three-dimensional model, map, cross-section, West Siberian megabasin.

С начала освоения глубоких отложений Западной Сибири накоплен существенный объем гидрогеохимических данных (более 16 тыс. анализов) и информации о геологическом строении, полученной по геофизическим исследованиям, покрывающим практически всю территорию. Имеющиеся данные и развитие современных технологий дают широкие возможности для совместного достаточно детального пространственного анализа данных. Методы трехмерного моделирования, успешно применяются в исследованиях глубоких отложений при построении геологических, гидродинамических и других моделей. Однако их использование для анализа гидрогеохимических данных ограничивается спецификой информации, а именно неравномерным распределением по площади и в разрезе отложений, интервальностью данных, а также сложностью учета структурно-литологических неоднородностей.

Построение трехмерной гидрогеохимической модели, с учетом специфики данных, основано на методе предварительного расчета условно-двумерных (радиальных) профилей, приведенном в работе [1]. Расчет радиального профиля осуществляется с использованием методов двумерного картирования, где в пределах заданного радиуса на него выносятся фактические данные опробований (минерализация подземных вод или содержание отдельных водорастворенных компонентов). В качестве координат при построении рассматриваются расстояние (радиус) от точки рассчитываемого профиля и глубина отложений. При расчете закладывается модель унаследованного осадконакопления и данные интервалов опробования проецируются на глубину в точке профиля, затем по линии профиля снимаются значения картируемого параметра.

Для автоматизации расчетов модели разработан отдельный модуль, интегрированный в программный комплекс Rack, позволяющий в автоматическом режиме выполнять расчеты условно-двумерных профилей по заданной сетке точек. При этом двумерные построения профилей выполняются с использованием расчетной части программного комплекса GST [2], в основу которого заложен аппроксимационный вариационно-сеточный метод геокартирования [3, 4]. В рамках этого метода имеется возможность количественного определения и картирования дополнительного показателя – коэффициента устойчивости [5], с помощью которого можно охарактеризовать надежность результатов трехмерного моделирования фактическими данными.

На данный момент программный модуль позволяет строить в автоматическом режиме как трехмерную модель отдельного гидрохимического параметра, так и серии покомпонентных моделей для промежуточных расчетов условно-двумерных профилей [6] с одинаковыми управляющими параметрами (шаг сетки расчета профилей, размер расчетной области, весовые коэффициенты на гидрохимические данные и параметры), обеспечивающие учет структурно-литологического строения отложений. Достоверность выбора управляющих параметров оценивается экспертно с помощью построения отдельных радиальных профилей. В программном модуле реализованы возможности загрузки данных, необходимых для расчета модели, – результатов гидрохимических опробований, карт основных структурных горизонтов и сетки координат радиальных профилей как из специализированной базы данных, так и из отдельных файлов.

Результатом расчета трехмерной модели являются значения содержания гидрохимического компонента в подземных водах и соответствующие им значения коэффициентов устойчивости с глубиной во всех точках сетки модели. Возможности комплекса позволяют сохранить полученную модель и использовать ее для расчетов в других приложениях либо проводить построения гидрохимических разрезов и карт в самом модуле, с привлечением расчетной части программного комплекса GST [2].

Полученные данные трехмерной сеточной модели могут быть использованы для картирования гидрохимических параметров (и связанных с ними карт коэффициентов устойчивости) в пределах отдельных свит и подсвит, а также гидрогеохимических разрезов. Картирование гидрохимического параметра выполняется в пределах кровли и подошвы соответствующих отложений, загружаемых в программный модуль. Построение карты в каждой точке ее сетки выполняется по средним значениям данных в узлах трехмерной модели, расположенным между кровлей и подошвой изучаемых отложений. В условиях увеличения точек сетки карты по сравнению с построенной моделью дополнительные точки рассчитываются путем нахождения средневзвешенного значения ближайших узлов.

Гидрохимические разрезы строятся по линиям, проходящим через точки профилей рассчитанной пространственной трехмерной модели. При необходимости расчета дополнительных точек профилей, расположенных вне сетки модели их вычисление осуществляется путем нахождения средневзвешенного значения ближайших узлов трехмерной модели. Построение пересекающихся линий разрезов выполняется аналогично, но дополнительно осуществляется расчет профиля в точке их пересечения, что обеспечивает согласованность построений. Картирование гидрохимического разреза по данным осуществляется учетом специализированного радиальных профилей c подхода, позволяющего учитывать модель структурно-литологического строения отложений [7].

С использованием разработанного программного модуля рассчитана региональная трехмерная модель изменения минерализации подземных вод и содержания основных водорастворенных компонентов юрско-меловых отложений в пределах всей территории Западно-Сибирского мегабассейна с оценкой ее надежности. Всего рассчитано 3674 радиальных профиля с шагом сетки 25 км. На рисунке 1 представлены некоторые результаты моделирования — карта изменения минерализации подземных вод в отложениях васюганской свиты и гидрохимический разрез субмеридионального направления с характеристикой надежности построений по линии разреза.

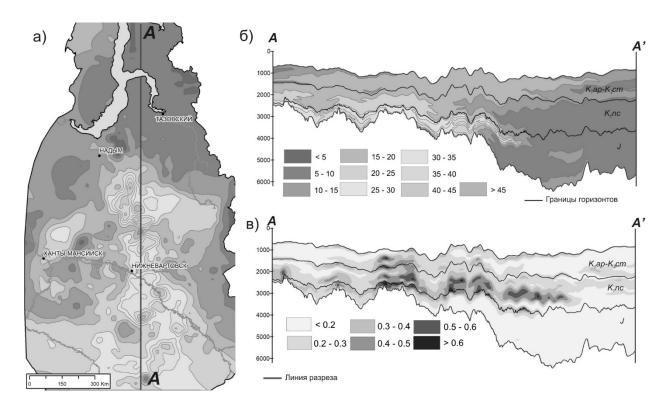


Рис. 1. Результаты расчета трехмерной модели минерализации подземных вод (мг/дм<sup>3</sup>): a – в отложениях васюганской свиты;  $\delta$  – в юрско-меловых отложениях по линии разреза A-A';  $\epsilon$  – коэффициент устойчивости по линии разреза A-A'.

Используемый метод построения трехмерной гидрохимической модели позволяет выполнять эффективную обработку больших объемов информации, проводить однотипные расчеты для серии различных параметров и осуществлять на их основе построение карт и разрезов гидрохимических показателей с детальностью до отдельных водоносных горизонтов даже при отсутствии или недостаточном объеме фактических данных о химическом составе подземных вод (для прямых построений) в этих объектах, с оценкой надежности построений. Реализация автоматических расчетов модели в программном модуле позволяет выполнять оперативный пересчет модели при появлении новых анализов подземных вод, при этом не обязательно перестраивать всю модель, достаточно пересчитать только ту область, на которую окажут влияние новые данные.

На сегодняшний день по данным плотных геофизических исследований отложений мелового возраста Западной Сибири выявлено наличие достаточно большого количества разрывных зон различной формы и протяженности. При этом при построении геологических трехмерных моделей, как правило, по отдельным месторождениям информация по разломам учитывается. Соответственно нельзя исключать влияние разломных областей на изменение химического состава подземных вод глубоких горизонтов. Однако если для небольших областей (в пределах месторождения) моделирование систем разломных нарушений возможно, то для региональных построений ввиду различной изученности это пока затруднительно.

В связи с этим для примера оценки влияния блочного строения отложений на изменение гидрохимических параметров в качестве объекта исследований выбрана хорошо изученная область Колтогорско-Толькинской шовной зоны. В качестве основы для проведения анализа привлечена схема геодинамического районирования [8], для построения которой использована топографическая основа территории (рельеф, геометрия гидрографических объектов и т.д.), и имеющаяся информация о глубинном строении осадочного чехла и кристаллического фундамента бассейна. Результаты районирования

представлены в виде серии линеаментов различной длины, преимущественно северовосточной и северо-западной направленности, обозначенных цифрами от I до III. Выделенные линейные зоны делят рассматриваемую территорию на шесть областей, обозначенных буквами от A до F.

Для построений принято, что эти геодинамические зоны делят территорию на отдельные блоки, проходящие через всю толщу юрско-меловых отложений вертикально. При построении трехмерной модели расчет точек профилей осуществлялся независимо по каждому блоку, с учетом той гидрохимической информации, которая получена только в его пределах.

Результаты моделирования, по аналогии с вышеприведенной гидрогеохимической моделью, можно представить в виде карт и разрезов. Картирование полученных данных в пределах свит осуществлено по отдельным блокам с учетом трендовой составляющей – грида, полученного по данным гидрохимических опробований с более низким весовым коэффициентом. Далее блоки карты совмещены и в результате получается общая карта изменения гидрохимического параметра. Построение гидрохимических разрезов, пересекающих границы блоков, рассчитывалось аналогично, по каждой из частей разреза, расположенного в разных блоках с дальнейшим их совмещением и получением единого разреза.

Всего в пределах рассматриваемой области количество гидрогеохимических опробований составляет более 4.5 тыс. анализов, из них 2753 опробования отобраны из неокомских отложений, 1661 пробой охарактеризован юрский комплекс и 421 опробование апт-альб-сеноманских подземных вод. На рисунке 1, а, представлена карта изменения минерализации подземных вод юрского гидрогеологического комплекса, построенная по данным гидрохимических опробований подземных вод, при этом минерализация подземных вод по представленным блокам значительно отличается.

Расчеты гидрогеохимической модели с учетом геодинамического районирования выполнены в полуавтоматическом режиме, при этом шаг сетки условно-двумерных профилей выбран равным 50 км, всего рассчитано 96 точек радиальных профилей, характеризующих изменение минерализации подземных вод. Результаты моделирования гидрогеохимических условий в области Колтогорско-Толькинской шовной зоны представлены в виде карт изменения минерализации отдельных свит и гидрогеохимических разрезов, секущих разные блоки. На рисунке 2 приведены карты в пределах юрского гидрогеологического комплекса — васюганской, тюменской и котухтинской свит (рис. 2,  $\delta$ ,  $\epsilon$ ,  $\epsilon$ ) и гидрогеохимического разреза A-A', проходящего через блоки C и D (рис. 2,  $\delta$ ).

Отличия в изменении минерализации подземных вод наблюдаются практически по всем границам соседних блоков в отложениях представленных свит. При этом области повышенных значений приурочены к блоку A, где с глубиной отмечается увеличение области повышенных значений от  $20~\text{г/дм}^3$  в васюганской свите до более  $30~\text{г/дм}^3$  в котухтинской. В блоке E наблюдается, наоборот, уменьшение минерализации с глубиной.

По линии разреза (рис. 1,  $\delta$ ), отчетливо просматриваются различия в изменении минерализации подземных вод на границе разных блоков. В отложениях апт-альб-сеноманского комплекса блок C характеризуется более высокими значениями минерализации, чем блок D, в нижних частях неокома блок D отличается наличием более минерализованных прослоев. А в юрских отложениях в блоке C наблюдается нормальное распределение минерализации (увеличение значений с глубиной), в соседнем блоке — инверсионное.

Полученные карты и разрезы изменения гидрохимических параметров наглядно представляют имеющиеся изменения в гидрохимических показателях в пределах отдельных блоков и вдоль их границ. Автоматизация расчетов построения трехмерных гидрохимических моделей, на основе рассмотренного подхода с учетом границ геодинамических блоков, реализуется в программном комплексе Rack на основе

программного модуля трехмерного моделирования, с учетом более сложных разломных элементов, выделяемых по отдельным отложениям и с различной конфигурацией.

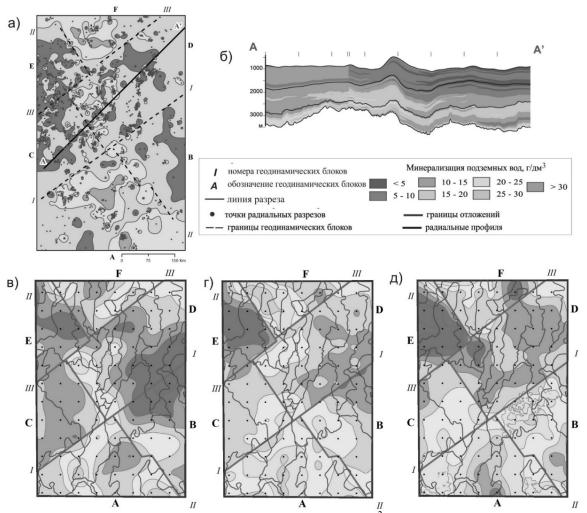


Рис. 2. Изменение минерализации подземных вод (мг/дм³): a — по данным опробований в отложениях юрского комплекса; по результатам расчета трехмерной модели с учетом геодинамических блоков:  $\delta$  — по линии разреза A-A',  $\epsilon$ ,  $\epsilon$ ,  $\delta$  — в отложениях васюганской, тюменской и котухтинской свит.

### Список литературы

- 1. Ицкович М.В., Плавник А.Г. Метод построения согласованной квазитрехмерной модели изменения гидрогеохимических условий глубоких горизонтов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2018. № 2. С. 23–31.
- 2. Свидетельство о регистрации программы GST в Реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2005612939. 2005.
  - 3. Волков В.А. Геологическое картирование нефтегазоносных территорий с помощью ЭВМ. 1988.
- 4. Plavnik A.G. Generalized spline-approximation problem formulation for spatial data modeling in geosciences // Russ. Geol. Geophys. 2010. Vol. 51, № 7. P. 801–807.
- 5. Плавник А.Г. Оценка устойчивости решения задачи картирования в рамках сплайнаппроксимационного подхода // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010. № 9. С. 20–27.
- 6. Kurchikov A.R., Plavnik A.G., Itskovich M. V. Quasi-three-dimensional modelling of the Jurassic-Cretaceous sediments hydrogeochemical conditions in the central part of the West Siberian megabasin // Appl. Geochemistry. 2019. Vol. 110, № June. P. 104433.
- 7. Plavnik A.G., Sidorov A.N. Mapping the Properties of Geological Objects with Allowance for Anisotropy Based on the Simulation of the Deformation Transformation // Math. Model. Comput. Simulations. 2018. Vol. 10, № 5. P. 629–638.
- 8. Kurchikov A.R., Plavnik A.G., Itskovich M. V. Comparison of Hydrogeochemical and Geodynamic Conditions in Deep Horizons in the Central West-Siberian Megabasin // Water Resour. 2020. Vol. 47, № 3. P. 468–477.

# К ВОПРОСУ О РОЛИ ЭЛИЗИОННОГО ВОДООБМЕНА В ФОРМИРОВАНИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ СЕВЕРНЫХ РАЙОНОВ НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-365-369

Рыжкова С.В.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, rizhkovasv@jpgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены результаты расчета объемов элизионных вод, отжатых в ходе уплотнения глинистых пород среднеюрских, верхнеюрских и нижнемеловых отложений на время формирования алымского, кузнецовского и талицкого горизонтов, соответствующих этапам тектонического покоя. Наибольшие объемы воды – от 2123 до 14142 млн м³ – на этапе формирования талицкого горизонта по всем изученным комплексам отложений отжаты в пределах Межовского структурного мегамыса. При этом наибольшие средние объемы отжатой воды по среднеюрским отложениям установлены для Лавровского наклонного мезовала и Чузикско-Чижапской мезоседловины (20 млн м³/км²), по верхнеюрским – для Нюрольской мегавпадины и Северо-Межовской мегамоноклинали (33 и 34 млн м³/км²), по нижнемеловым – для Нюрольской мегавпадины и Межовского структурного мегамыса (141 и 118 млн м³/км²).

**Ключевые слова:** палеогидрогеологические реконструкции, элизионный водообмен, миграция, месторождения углеводородов, Западно-Сибирский мегабассейн.

**Abstract**. The work presents the results of the calculation of the volume of elision waters pressed out during densification of clay rocks in Middle Jurassic, Upper Jurassic and Lower Cretaceous sediments at the time of formation of the Alym, Kuznetsovo and Talitsky horizons corresponding to the stages of tectonic quiescence. The largest volumes of water, from 2123 to 14142 mln m³, were pressed out at the stage of the formation of Talitsky horizon within the Mezhovskiy structural mega-cape. The largest average volumes of water pressed out from the Middle Jurassic sediments were established for the Lavrovo sloping meso-bar and the Chuzik-Chizhap meso-saddle (20 mln m³/km²), from Upper Jurassic sediments - for the Nyurol mega-depression and the North-Mezhovo mega-monocline (33 and 34 mln m³/km²), from Lower Cretaceous sediments - for the Nyurol mega-depression and the Mezhovo structural mega-cape (141 and 118 mln m³/km²).

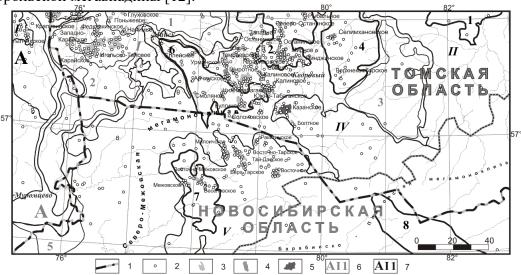
**Key words**: paleohydrogeological reconstructions, elision water exchange, migration, hydrocarbon deposits, West Siberian mega-basin.

Основоположником палеогидрогеологии по праву считается П.Н. Чирвинский [1], а дальнейшее становление этого научного направления связано с именами А.А. Карцева, С.Б. Вагина, Е.А. Баскова, И.С. Грамберга, А.М. Никанорова, Я.А. Ходжакулиева, Л.А. Абуковой и других [2–6]. К сожалению, в последние годы в научной литературе выходит в свет крайне мало работ, посвященных палеогидрогеологическим исследованиям, несмотря на их высокую результативность при поисках месторождений углеводородов [7–9].

В северных районах Новосибирской области открыто девять месторождений нефти. Основным продуктивным горизонтом являются верхнеюрские отложения. Высокая анизотропия фильтрационно-емкостных свойств песчаников, слагающих продуктивный горизонт  $\mathrm{IO}_1$ , обусловлена как палеогеографическими факторами, так и историей тектонического развития территории и связанного с этим элизионного водообмена. Отжатие свободной и связанной воды из глинистых пород на разных этапах погружения не только влияло на характер гидродинамического поля, но и способствовало, в частности, поступлению в продуктивный горизонт  $\mathrm{IO}_1$  инородных по химическому составу вод и изменению фильтрационно-емкостных свойств коллектора.

Для оценки объемов элизионных вод анализировался геолого-геофизический материал по территории междуречья рек Тара и Васюган. Административно она приурочена к северо-западной части Новосибирской области и прилегающих районов Омской и Томской областей (рисунок). Мезозойско-кайнозойские отложения осадочного чехла в пределах территории исследования залегают на разновозрастных породах фундамента: в западной части — преимущественно вулканогенно-осадочных, а в восточной — карбонатных [10]. Разделяет их Межовский гранитоидный массив. Осадочный чехол сложен терригенными полифациальными осадками юры, мела и кайнозоя. В тектоническом плане Западно-Сибирской геосинеклизы исследуемый регион охватывает юго-восточную часть

Среднеобской региональной ступени и прилегающей с юго-востока части Внешнего пояса. В зоне их сочленения выделяются полузамкнутые положительные структуры «переходного» типа. Их формирование связано с региональными процессами воздымания восточных и юговосточных районов, особенно интенсивно протекавшими на новейшем этапе развития Западно-Сибирской геосинеклизы [11].В мезозойско-кайнозойское Верхневасюганская антеклиза и Западно-Межовское куполовидное поднятие постоянную преимущественно положительную тенденцию развития, центральная часть Нюрольской мегавпадины, Чузикско-Чижапская мезоседловина, а также Кыштовский наклонный мезопрогиб – преимущественно отрицательную. К зонам чередования тектонических движений разного знака с преимущественно положительным их характером на неотектоническом этапе отнесены Лавровский наклонный мезовал, восточная часть Межовского структурного мегамыса, Горелоярское куполовидное мезоподнятие и южная часть Нюрольской мегавпадины [12].



Обзорная карта района исследований. I — административные границы; 2 — скважины; месторождения: 3 — нефтяные, 4 — нефтегазоконденсатные, 5 — газоконденсатные и газовые; Тектонические элементы по [11]: 6 — отрицательные: надпорядковый: A — Колотогорско-Нюрольский желоб, I порядка: I — Нюрольская мегавпадина, II порядка: 1 — Центрально-нюрольская мезовпадина, 2 — Южно-Нюрольская мезовпадина, 3 — Бакчарская мезовпадина, 5 — Кыштовский наклонный мезопрогиб; 7 — положительные: надпорядковый: A — Верхневасюганская антеклиза, I порядка: I — Верхнедемьянский мегавал, II — Парабельский наклонный мегавал, IV — Калгачский наклонный мегавал, IV — Межовский структурный мегамыс, II порядка: I — Колпашевский мезовал, IV — Пудинское куполовидное мезоподнятие, IV — Павровский наклонный мезовал, IV — Западно-Межовское куполовидное мезоподнятие, IV — Верхнешегарский мезовыступ.

На этапах тектонического покоя проходило формирование преимущественно глинистых пачек в составе баженовского, алымского, кузнецовского и талицкого стратиграфических горизонтов 145, 100.5, 89.8 и 61.6 млн лет назад соответственно [11]. Наименования изученных этапов отжатия вод из преимущественно глинистых пород даны по горизонтам, так как соответствуют времени формирования вышеуказанных пачек.

В ходе расчета мощности преимущественно глинистых пород учитывались следующие особенности геологического строения территории. Нижнеюрские и ааленские отложения распространены фрагментарно, в пределах наиболее погруженных районов, приуроченных к Нюрольской мегавпадине, Дедовской впадине, Южно-Пудинскому прогибу и др. [11, 13, 14]. В байосский век область аккумуляции охватила практически всю территорию исследования, за исключением отдельных локальных поднятий на Веселовском валу. Формирование тюменской свиты проходило в обстановке низменной равнины. Вследствие низкого базиса эрозии в составе отложений преобладал песчано-алевритовый

материал, происходили интенсивные процессы торфонакопления. Количество и мощность пластов углей, сформированных на последующих этапах катагенеза, разные для западной и восточной части территории исследования. В келловей-волжское время вследствие трансгрессии моря практически вся территория исследований оказалась в области морской аккумуляции осадков. В это время проявилось отличие в расположении относительно региональных источников сноса западной и восточной части территории исследований. Количество алевритовой фракции в составе глинистых пород васюганской, георгиевской и баженовской свит увеличивается в восточном и южном направлениях от Нюрольской мегавпадины. Периодическое торфонакопление способствовало формированию на этапе катагенеза нескольких пластов углей мощностью 0.5-1.5 м в пределах Чузикско-Чижапской мезоседловины и прилегающих территорий, включая восточную часть Межовского Берриас-барремские мегамыса. отложения, слагающие клиноформный комплекс, формировались в обстановке лавинного бокового заполнения морского бассейна [15]. Их мощность вместе с перекрывающими преимущественно глинистыми отложениями алымского горизонта составляет в среднем по территории 900 м, что почти в три раза больше мощности юрских отложений и немного меньше мощности вышезалегающих верхнемеловых отложений (1140 м). Особенность строения изучаемой территории состоит в том, что больше половины (около 65 %) разреза неокомского комплекса слагают преимущественно континентальные отложения киялинской свиты [15-17]. Мощность глинистых отложений куломзинской свиты, формировавшихся в морской обстановке, в среднем по территории колеблется в пределах 300-200 м, увеличиваясь в западном направлении.

Пластовые давления в основном соответствуют гидростатическому, следовательно, осадочные породы формировались лишь под воздействием нагрузки вышележащих пород [18]. Породы относятся к нормально уплотненным, что послужило основанием для выбора методики расчета объемов воды.

Расчет объема элизионных вод, отжатых в ходе уплотнения горных пород, производился по методике, опубликованной в работе [19]:  $V_B = Sh_i \frac{n_0 - n_i}{1 - n_0} = Sh_i P_r$  (1) где Vв – объем отжатой воды, млн м $^3$ /км $^2$ ; S – площадь распространения уплотняющихся пород (принимается одинаковой до и после уплотнения),  $\kappa m^2$ ;  $h_i$  – мощность отложений, м;  $n_0, n_i$  — средневзвешенная по мощности абсолютная пористость пород изучаемого комплекса соответственно до и после уплотнения, доли единицы. Первичная пористость в конце преобразования осадка в молодую породу (пористость до уплотнения  $n_0$ ) принималась 0.41 [19]. Средневзвешенная по глубине абсолютная пористость  $n_i$  определялась по графику приведенному в [19]. Для выполнения расчета сформирована следующая база данных: мощность глинистых пород в каждом анализируемом комплексе, глубина комплекса на время формирования алымского, кузнецовского и талицкого горизонтов. Мощность глинистых и углистых пород определена по скважинам. Литологическая интерпретация электрического, радиоактивного и акустического каротажа и кавернометрии проводилась в соответствии с работой [20]. Для определения палеоглубин анализируемых комплексов использовался каталог кровли свит (ИНГГ СО РАН). По результатам анализа данных глубокого бурения были рассчитаны объемы воды, отжатой из глинистых пород на этапах накопления вышележащих берриас-аптских отложений неокома (поверхность выравнивания алымская свита и ее стратиграфические аналоги, 571 скважина), апт-туронских (поверхность выравнивания подошва кузнецовской свиты, 476 скважин) и верхнемеловых отложений (поверхность выравнивания подошва талицкой свиты, 210 скважин). Анализ полученных данных позволил провести оценку объемов элизионных вод.

На время накопления алымского горизонта из преимущественно глинистых пород (далее для краткости глин) среднеюрских отложений наибольшее количество воды (1028 млн м³) отжато в пределах Межовского структурного мегамыса, причем в западной его части, а наименьшее – в Северо-Межовской мегамоноклинали (228 млн м³). Эта тенденция

сохраняется далее в ходе уплотнения этих отложений на время формирования кузнецовского и талицкого горизонтов. Аналогичная закономерность установлена для глин нижнемелового комплекса. Для глин верхнеюрского комплекса выявлена иная закономерность. Минимальные объемы элизионных вод на всех изученных этапах характерны для Северо-Парабельской мегамоноклинали (от 344 до 674 млн м³), наибольшие — на время формирования алымского горизонта для Нюрольской мегавпадины (1518 млн м³), а на время кузнецовского и талицкого горизонта — для Межовского структурного мегамыса (3047 и 3400 млн м³ соответственно).

Иное распределение по тектоническим элементам имеет средний объем элизионных вод, отжатых с площади 1 км² (далее объем истечения). Максимальные его значения от 10 до 20 млн м³/км² для среднеюрского комплекса на всех изученных этапах характерны для Лавровского наклонного мегавала, Чузикско-Чижапской мезоседловины и Северо-Парабельской мегамоноклинали, минимальное от 8 до 17 млн м³/км² – для Северо-Межовской мегамоноклинали (таблица). Для верхнеюрского комплекса минимальные объемы истечения от 10 до 19 млн м³/км² характерны для Чузикско-Чижапской мезоседловины, а максимальные от 18 до 34 млн м³/км² – для Северо-Межовской мегамоноклинали, при этом на кузнецовское и талицкое время они сопоставимы с объемами для Нюрольской мегавпадины (30 и 33 млн м³/км²). Для нижнемелового комплекса на кузнецовское и талицкое время минимальные объемы истечения от 93 до 118 млн м³/км² характерны для Межовского структурного мегамыса, а максимальные от 112 до 141 млн м³/км² – для Нюрольской мегавпадины.

Распределение по тектоническим элементам средних объемов элизионных вод, отжатых из преимущественно глинистых отложений с площади 1 км<sup>2</sup>

J	Средний объем отжатой воды, млн м <sup>3</sup> /км <sup>2</sup>							
ТЭ	Средне-	Верхне-	Средне-	Верхне-	Нижне-	Средне-	Верхне-	Нижне-
	юрские	юрские	юрские	юрские	меловые	юрские	юрские	меловые
	на	на	на	на	на	на	на	на
	алым.	алым.	кузнец.	кузнец.	кузнец.	талиц.	талиц.	талиц.
1	9	17	14	30	112	18	33	141
2	8	18	13	31	102	17	34	129
3	9	14	13	25	93	18	28	118
4	10	13	15	23	103	20	26	130
5	10	10	15	17	102	20	19	129
6	10	11	15	19	100	20	22	126

Примечание. ТЭ — тектонический элемент: 1 — Нюрольская мегавпадина, 2 — Северо-Межовская мегамоноклиналь, 3 — Межовский структурный мегамыс, 4 — Лавровский наклонный мезовал, 5 — Чузикско-Чижапская мезоседловина, 6 — Северо-Парабельская мегамоноклиналь; толщиной шрифта выделены максимальные и минимальные значения.

Таким образом, полученные данные по объему элизионных вод показывают сложный характер их распределения по территории на разное время. Наибольшие объемы воды от 2123 до 14142 млн м<sup>3</sup> на этапе формирования талицкого горизонта по всем изученным комплексам отложений отжаты в пределах Межовского структурного мегамыса. При этом наибольшие средние объемы отжатой воды по среднеюрским отложениям установлены для Лавровского наклонного мезовала и Чузикско-Чижапской мезоседловины (20 млн м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>), по верхнеюрским – для Нюрольской мегавпадины и Северо-Межовской мегамоноклинали (33 и 34 млн м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>), по нижнемеловым – для Нюрольской мегавпадины и Межовского структурного мегамыса (141 и 118 млн м<sup>3</sup>/км<sup>2</sup>). Построение на основе полученных данных карт распределения объемов истечения и их комплексный анализ с палеоструктурными картами позволят рассмотреть направления и объемы элизионных вод для средне- и верхнеюрского комплексов на время вхождения в главную зону нефтеобразования (время

формирования кузнецовского горизонта), а для нижнемелового — на талицкое время, предполагая эмиграцию углеводородов из баженовской свиты, распространенной в пределах Нюрольской мегавпадины. Предварительный анализ показал, что противоположная направленность потоков отжатых вод Нюрольской мегавпадины и Межовского структурного мегамыса могла послужить причиной отсутствия залежей в структурных ловушках верхнеюрского комплекса Северо-Межовской мегамоноклинали.

Исследования проводились при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540006.

## Список литературы

- 1. Чирвинский П.Н. Палеогидрогеология // Проблемы современной геологии. 1933. Т. 3, № 8. С. 107—122.
  - 2. Карцев А.А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. М.: Гостоптехиздат, 1963. 353 с.
  - 3. Карцев А.А., Вагин С.Б., Басков Е.А. Палеогидрогеология. М.: Недра, 1969. 152 с.
  - 4. Грамберг И.С. Палеогидрогеохимия терригенных толщ. Л.: Недра, 1973. 172 с.
- 5. Никаноров А.М., Волобуев Г.П., Барцев О.Б. Палеогидрогеологические реконструкции нефтегазоносных бассейнов. М.: Недра, 1975. 192 с.
- 6. Ходжакулиев Я.А., Абукова Л.А. Палеогидрогеологические исследования при поисках нефти и газа. М.: Недра, 1985. 209 с.
- 7. Шварцев С.Л., Новиков Д.А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика, 2004. Т. 45, № 8. С. 1008–1020.
- 8. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development. 2017. V. 44, N 5. P. 780–788.
- 9. Новиков Д.А., Черных А.В., Садыкова Я.В., Дульцев Ф.Ф., Хилько В.А., Юрчик И.И. Эволюция гидрогеохимического поля северных и арктических районов Западно-Сибирского осадочного бассейна в мезозое // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 10. С. 165–180.
- 10. Елкин Е.А., Краснов В.И., Бахарев Н.К., Белова Е.В., Дубатолов В.Н., Изох Н.Г., Клец А.Г., Конторович А.Э., Перегоедов Л.Г., Сенников Н.В., Тимохина И.Г., Хромых В.Г. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Палеозой Западной Сибири / Ред. Е.А. Елкин, В.И. Краснов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001. 163 с.
- 11. Конторович В.А., Беляев С.Ю., Конторович А.Э., Красавчиков В.О., Конторович А.А., Супруненко О.И. Тектоническое строение и история развития Западно-Сибирской геосинеклизы в мезозое и кайнозое // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 11–12. С. 1832–1845.
- 12. Рыжкова С.В. История развития юрского структурного яруса и нефтегазоносность южных районов Обь-Иртышского междуречья // Геология нефти и газа. 2009. № 1. С. 54–63
- 13. Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Л.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 8. С. 972—1012.
- 14. Шурыгин Б.Н., Никитенко Б.Л., Девятов В.П., Ильина В.И., Меледина С.В., Гайдебурова Е.А., Дзюба О.С., Казаков А.М., Могучева Н.К. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Юрская система. Новосибирс:, Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2000. 480 с.
- 15. Конторович А.Э., Ершов С.В., Казаненков В.А., Карогодин Ю.Н., Конторович В.А., Лебедева Н.К., Никитенко Б.Л., Попова Н.И., Шурыгин Б.Н. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5–6. С. 745–776.
- 16. Даненберг Е.Е., Белозеров В.Б., Брылина Н.А. Геологическое строение и нефтегазоносность верхнеюрско-нижнемеловых отложений юго-востока Западно-Сибирской плиты (Томская область). Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 291 с.
- 17. Стратиграфический словарь мезозойских и кайнозойских отложений Западно-Сибирской низменности. Л.: Недра, 1978. 183 с.
- 18. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В., Рыжкова С.В. Гидродинамические особенности нефтегазоносных отложений южных районов Обь-Иртышского междуречья // Георесурсы. 2019. Т. 21, № 4. С. 85–94.
- 19. Алексеев Г.И., Андреев В.Н., Горелов А.А., Казьмина Л.Л. Методы изучения уплотнения терригенных пород при палеогеологических реконструкциях. М.: Наука, 1982. 144 с.
- 20. Ежова А.В. Геологическая интерпретация геофизических данных. 3-е изд. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 116 с.

# ПРОВЕДЕНИЕ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ РАБОТ ДЛЯ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ ПРЕДЕЛЬНОЙ ГАЗОНАСЫЩЕННОСТИ ПЛАСТА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-370-373

Сурнин А.И., Литвинова И.В., Кряжев А.А., Шаманова А.А., Дозорцев Н.В. *AO «СНИИГГиМС», Новосибирск, одес@sniiggims.ru* 

**Аннотация.** Обсуждаются методические особенности проведения опытно-фильтрационных работ в сеноманском водоносном комплексе и обработки полученных данных для обеспечения технологической системы поддержания пластовых давлений в залежах нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири.

**Ключевые слова:** подземные воды, водозаборная скважина, откачка, дебит, приемистость, газовый фактор, газлифт.

**Abstract.** The methodological features of experimental filtration operations in the Cinemania aquifer complex and processing of the obtained data to provide a technological system for maintaining reservoir pressures in the oil and gas fields of Western Siberia are discussed.

Key words: underground water, water supply well, drawdown, well rate, intake, gas factor, gas lift.

В 2020 г. авторами выполнены опытно-фильтрационные работы (ОФР) в апт-альб-сеноманском водоносном комплексе на одном из лицензионных участков добычи нефти и газа на западе Томской области. Объект исследования – соленые воды покурской свиты апт-альб-сеноманского водоносного комплекса (ВК) — широко используется в системе поддержания пластового давления (ППД) при освоении нефтяных месторождений Западной Сибири. Для этого действуют подземные технологические водозаборы.

## Геологические особенности проведения ОФР в апт-альб-сеноманском ВК на изученном участке

- Интервал залегания водоносных горизонтов покурской свиты ( $K_{1-2}$ pk) ~600–1500 м, что соответствует зоне нефтегазоносного разреза. Литологически это труднокоррелируемая толща субгоризонтальных, нерегулярно/хаотично переслаивающихся глинистых и песчаных пластов. В гидрогеологическом отношении толща схематизируется как условно однородная. Эффективная мощность водоносного комплекса ~240–250 м.
- Подземные воды апт-альб-сеноманского комплекса высоконапорные. Уровень устанавливается на глубине 10–25 м от дневной поверхности.
- Температура разреза в интервале размещения ВК: 30–50 °С.
- Состав пластовых вод хлоридный натриевый с минерализацией 17 г/л, измеренная плотность воды  $1.01~\text{г/cm}^3$ .
- Газовый фактор (ГФ) определен прямым измерением объема выделившегося газа из пробы воды, изолированной на отрезке напорной линии (между задвижкой и обратным клапаном). ГФ =  $V_{\text{газа}}/V_{\text{воды}} = 0.81 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , что приближается к предельному насыщению. Выполненная по методу И.К. Зерчанинова оценка показывает разницу между пластовым давлением и давлением насыщения водорастворенных газов ( $P_{\text{пл}}-P_{\text{г}}$ )  $\approx 0.3$ –0.4 ат.

## Технология проведения ОФР

Опытно-фильтрационные работы были выполнены в трех одиночных водозаборных скважинах на разных кустовых площадках (условно скважины № 1, 2, 3).

Скважины оборудованы единообразно: водоприемная часть размещается в эксплуатационной (фильтровой) колонне Ø168 мм, башмак которой опирается на забой и зацементирован, а «голова» установлена «впотай» на сальниковых креплениях в кондукторе. Приток воды в скважину осуществляется через дырчатые фильтры, сформированные путем прострела колонны кумулятивными пулевыми перфораторами марки ЗПКС-80. Интервалы перфорации выбраны по данным ГИС, они размещаются напротив групп водоносных пластов в нижнепокурской подсвите — с наилучшими фильтрационно-емкостными характеристиками. Общая длина интервала перфорации 60–70 м.

Оборудование устьев водозаборных скважин также типовое: замеры уровней воды осуществляются в затрубном пространстве через пьезометрическую трубку (вн. Ø 20 мм), установленную на планшайбе эксплуатационной колонны рядом с водоподъемной насосно-компрессорной трубой (НКТ-89). Это позволяет использовать электроконтактные уровнемеры.

Откачка воды осуществлялась погружным насосом типа ЭЦВН с номинальной производительностью 250 м<sup>3</sup>/сут. Глубина спуска насоса ~350 м.

<u>Процесс откачки</u> во всех случаях проходил по схожему сценарию. Анализ графика изменения динамического уровня в период откачки (на примере скважины № 1) позволяет разделить его на четыре неравных этапа:

- 1. Этап первого снижения уровня. В первые минуты работы насоса (рабочая частота электродвигателя 40 Гц) уровень воды в скважине снижается от статического положения 20.12 м до 23.6–24.3 м и удерживается на этих глубинах в течение ~30 мин.
- 2. Этап влияния газлифта. В результате резкого сброса давления и срезки столба воды происходит его спонтанное разгазирование («вскипание») и разуплотнение, сопровождающееся эффектом газлифта ростом объема и соответствующим подъемом уровня воды в работающей скважине. Мощности насоса при начальной рабочей частоте и производительности 8.0–8.4 м³/ч (202–192 м³/сут) недостаточно, чтобы справиться с процессом газлифта. В результате наблюдается инверсионный подъем динамического уровня в течение 10–11 ч (Δh= 2.93 м) при работающем насосе.

На этом уровне *устанавливается динамическое равновесие* между производительностью насоса, притоком из пласта и потенциалом газлифта. Стабильное положение уровня газированной воды на глубине 21.37 м при дебите скважины  $8 \text{ м}^3/\text{ч}$  прослежено в течение 15 ч.

- 3. Этап второго снижения уровня. Чтобы преодолеть застой гидродинамической системы в скважине и продолжить откачку, было принято решение об увеличении производительности погружного насоса. Для этого рабочая частота электродвигателя насоса была постепенно поднята от 40 до 50 Гц в течение семи часов. Это привело к положительному результату и проявилось в возрастании дебита до 12 м<sup>3</sup>/ч и уверенном снижении динамического уровня до глубины 23.43 м.
- 4. Этап выхода на квазистационарный режим. Откачка на предельной мощности насоса 50  $\Gamma$ ц продолжалась 40 ч. Последние 27 ч пласт работал в квазистационарном режиме: динамический уровень 23.68 $\rightarrow$ 23.92 м; понижение 3.6 $\rightarrow$ 3.8 м; дебит 12.1–12.0 м<sup>3</sup>/ч.

Запись кривой восстановления уровня (КВУ) осуществлялась с момента остановки насоса в течение 24 ч (на примере скважины № 1). На динамике восстановления статического уровня также сказался фактор высокой газонасыщенности пластовых вод. Процесс восстановления статического уровня можно разделить на три периода:

- 1. Период активного подъема уровня. В течение первых десяти минут после остановки насоса произошел «скачок» и последующий выход уровня на глубину 18.89 м, которая находится выше отметки статического уровня (20.12 м). Превышение над статическим уровнем составило 1.23 м. Это явление объясняется «газлифтированным» /разуплотненным/ состоянием столба пластовой воды в результате созданной в процессе откачки депрессии. Измеренная плотность воды составляла  $\gamma = 1.005-1.006 \text{ г/см}^3$  (против  $\gamma = 1.01 \text{ г/см}^3$  в дегазированном состоянии).
- 2. Период стабилизации уровня на глубинах 18.88–18.91 м наблюдался в течение ~50 мин. За этот период гидродинамическая система водоносного горизонта пришла в равновесное состояние.
- 3. Период снижения уровня воды в скважине до статического положения. В течение 21 ч 45 мин наблюдалось снижение уровня ( $18.91 \rightarrow 20.18$  м), которое происходило за счет «усадки» водного столба в скважине в результате свободной дегазации в атмосферу (выравнивание избыточного давления насыщения водорастворенных газов до атмосферного давления).

Опыт проведенных на описываемом участке исследований показал, что возможны два варианта завершения ОФР на этапе восстановления уровня после откачки в газонасыщенном водоносном горизонте:

- 1. Прослеживание КВУ осуществляют при закрытой (не «разряженной») напорной линии системы ППД, которая находится под давлением до 200 атм. В этом случае дегазация водного столба происходит постепенно через устье водозаборной скважины (отверстие ø 20 мм для спуска уровнемера) и восстановление уровня проходит через три динамических периода, как описано выше (для скв. № 1).
- 2. При проведении откачки на скважине № 3 после остановки насоса напорную нагнетательную линию ППД, которая находилась под давлением 193.8 атм, «разрядили» в атмосферу и дегазация водного столба произошла практически мгновенно на первых минутах подъема уровня. В результате график КВУ в скважине 1-ВЗ не был искажен влиянием процессов газлифта. На завершающей фазе уровень дошел до наиболее высокой точки 13.03 м и потом «просел» на 4 см до статического положения 13.07 м. Таким образом, заметной «усадки» восстановленного водного столба за счет его дегазации, как в скважине № 1, не наблюдалось.

## Технология обработки результатов откачки

Для интерпретации материалов откачки в газонасыщенном пласте необходимо снять наложенное влияние «газлифта», которое проявляется инверсионным подъемом динамических уровней, и пересчитать измеренные в этих условиях значения уровней к «истинным». Для этого использованы следующие понятийные основания и методические приемы:

- 1. Гидродинамическая система эксплуатируемого водоносного комплекса покурской свиты характеризуется нормальным гидростатическим режимом: пластовые давления равны условному гидростатическому давлению на глубине замера, а статические уровни воды устанавливаются на глубине вблизи земной поверхности, поэтому известная методика определения истинного динамического уровня газонасыщенных вод в условиях проявления «газлифта» [1] в нашем случае не применима, так как разработана для фонтанирующих скважин с измеренным избыточным давлением на устье.
- 2. Такую возможность дает выполненная в процессе ОФР детальная запись процесса откачки. Как показано выше, весь график откачки дифференцируется на четыре этапа: первое снижение уровня, действие газлифта, второе снижение уровня, выход на «режим».

Для получения исправленного графика «истинных» значений динамических уровней со снятым эффектом «газлифта» взяли отрезок графика «первого снижения» и продолжили его с рассчитанным темпом падения динамических уровней, измеренных на этапе «второго снижения». В результате получен исправленный график — без инверсионного подъема ( $\Delta h$ ).

Подтверждение изложенной модели откачки и обоснованности исправленного графика «истинных» значений динамических уровней получено по независимым данным непрерывного мониторинга эксплуатации скважины. Построенный на этом материале временной график изменчивости забойных давлений на приеме насоса в период ОФР практически идентичен графику истинных динамических уровней.

## Технологические особенности и рекомендации к проведению ОФР в апт-альбсеноманском ВК для подсчета запасов подземных вод

Важная особенность проведения опытной откачки воды из глубоких горизонтов на промыслах с системой ППД – утилизация извлеченной из скважины воды нагнетанием в продуктивный нефтеносный пласт под давлением до 200 ат.

В этих условиях технический регламент не всегда позволяет сразу со старта эксплуатировать насос в режиме максимальной производительности из-за угрозы поломки оборудования. Требуется время на постепенный «разгон» электродвигателя насоса до оптимальной рабочей частоты с шагом  $\sim 0.5 \, \Gamma \text{ц/ч}$ . Это может занять несколько часов.

Кроме того, возможность выхода двигателя насоса на максимальную производительность может ограничиваться таким показателем, как «приемистость»

нагнетательных скважин, через которые вода закачивается в пласт: если этот показатель  $(м^3/ч)$  ниже производительности насоса, то в нагнетательной линии происходит критический рост давления.

Вторая принципиальная особенность проведения ОФР на промыслах с системой ППД связана с тем, что опытные работы выполняются в рамках утвержденной Технологической схемы освоения месторождения. Согласно ей, ОФР для подсчета запасов подземных вод производятся на начальной стадии эксплуатации месторождения, когда производительность водозабора и система ППД настроены и оборудованы под потребности этого начального периода. В то же время заявленная перспективная потребность воды для утверждения запасов ориентирована на прогнозируемый (через несколько лет) «пик» добычи углеводородов и существенно (в разы) превышает текущую производительность водозабора и техническую возможность утилизации такого количества поднятой воды путем ее закачки в принимающий продуктивный пласт.

Таким образом, заведомо невыполнимо действующее требование экспертизы о «подтверждении (достижении) заявленных проектных дебитов данными предшествующей эксплуатации водозабора и результатами проведенных опытно-фильтрационных работ». А это рассматривается как существенный методический недостаток и основание для неутверждения защищаемых запасов подземных вод, поэтому конструктивным следует признать возврат к прогнозу достижения заявленных проектных дебитов расчетными методами, а не требование их физической демонстрации.

При выполнении ОФР для минимизации воздействия явлений газлифта на динамику изменения уровней рекомендуется:

<u>на этапе откачки</u> использовать режим наибольшей производительности насоса, чтобы преодолеть инверсионный рост динамического уровня под действием явления газлифта и достичь требуемого /оптимального/ понижения;

<u>на этапе прослеживания КВУ</u> после остановки насоса следует сразу разрядить нагнетательную линию системы ППД, что приведет к быстрой спонтанной дегазации водного столба в скважине и практически исключит воздействие газлифта на характер кривой восстановления статического уровня.

Данные непрерывного мониторинга эксплуатации водозаборных скважин (телеметрии) по давлениям полноценно отражают динамику изменчивости напоров водоносного горизонта в водозаборных скважинах. Они могут быть представлены в виде динамических уровней (Ндин, м) путем стандартного пересчета давлений гидростатическим методом. Для корректировки расчетов  $H_{\text{дин}}$  путем определения и учета поправки на скважинных регистраторов давления  $(-\Delta h)$ необходимо выполнять периодические прямые измерения динамического уровня воды в скважинах.

## Список литературы

1. Керкис Е.Е. Методы изучения фильтрационных свойств горных пород. Л.: Недра, 1975. 231 с.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРЕОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВЕРХНЕЧОНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ПРОМЫШЛЕННОЙ КАТЕГОРИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОДДЕРЖАНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-374-378

Теняков Е.О. $^1$ , Белкин И.Ю. $^1$ , Данилова М.А. $^2$   $^1OOO$  «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, tnnc@rosneft.ru  $^2AO$  «Верхнечонскиефтегаз», Иркутск, vcng@rosneft.ru

**Аннотация:** В докладе освещены основные подходы, использованные при проведении работ по переоценке запасов на Верхнечонском МТПВ для целей поддержания пластового давления. Результатом проведения и интерпретации опытно-фильтрационных работ стало обоснование природной гидрогеологической модели отличной от принятой ранее. Анализ многолетних режимных наблюдений дал возможность оптимально распределить нагрузки на скважины, а также лег в основу построенной геофильтрационной модели месторождения, позволившей выявить непроницаемые барьеры, а также спрогнозировать геомиграцию сероводорода.

**Ключевые слова:** переоценка запасов, геофильтрационная модель, технические воды, Верхнечонское МТПВ.

**Abstract:** The report highlights the main approaches used in the work on revaluation of reserves at the Verkhnechonsky MTPV for the purposes of the maintaining reservoir pressure. The result of conducting and interpreting experimental filtration experiments was the justification of a natural hydrogeological model different from the previously adopted one. The analysis of long-term regime observations allowed us to optimally operating mode of wells, and also formed the basis of a geofiltration model of the field that helped to identify impermeable barriers, and to predict geomigration of hydrogen sulfide.

Key words: revaluation of reserves, geofiltration model, process water, Verkhnechonskoye field.

Верхнечонское нефтегазокондесатное месторождение (ВЧНГКМ) расположено в Катангском районе Иркутской области. Недропользователем является АО «Верхнечонскнефтегаз», входящее в структуру ПАО НК «Роснефть». Месторождение открыто в 1978 г., введено в разработку в 2008 г., с 2009 г. началось формирование системы поддержания пластового давления. Всего за период 2007–2020 гг. выполнено 13 отчетов с оценкой запасов подземных вод по различным категориям.

В настоящее время для обеспечения водой системы поддержания пластового давления (ППД) на месторождении функционирует 64 скважины, расположенные на трех участках — Восточно-Бираинском, Дагалдынском и Ирактаконском (рис. 1), суммарная добыча которых достигала в отдельные годы 31 тыс. м³/сут. Дебиты скважин варьируются от 50 до 990 м³/сут. На трех участках запасы подземных вод оценены по категории В, причем 60 % от всего объема разведаны на Восточно-Бираинском участке, 27 % на Дагалдынском, 13 % на Ирактаконском. Скважины на Чонском и Татариновском участках законсервированы, запасы по ним утверждены по категории С2.

В геологическом строении территории принимают участие образования археяпротерозоя, карбонатные породы нижнего и среднего отделов кембрия и осадочные породы среднего и верхнего отделов кембрия и юрской системы, а также четвертичные отложения. Нефтегазоносность Верхнечонского НГКМ связана с песчаниками и карбонатами венда и нижнего кембрия.

В рамках настоящей работы глубина изучения геологического разреза ограничивалась зоной свободного водообмена — вскрытием пород ангарской свиты нижнего кембрия (глубиной до 350 м). Отложения ангарской свиты выше перекрываются нижнесреднекембрийскими отложениями литвинцевской свиты. Ее мощность изменяется от 130 до 210 м. На породах литвинцевской свиты согласно залегают осадочные нерасчлененные средневерхнекембрийские отложения верхоленской и илгинской свит мощностью от 20 до 200 м. Несогласно на породах верхнего кембрия залегают отложения нижней юры мощностью до 80 м. Четвертичные отложения распространены повсеместно, представлены различными генетическими типами, из которых преобладающими являются аллювиальные и элювиально-делювиальные со средней мощностью 1–3 м.

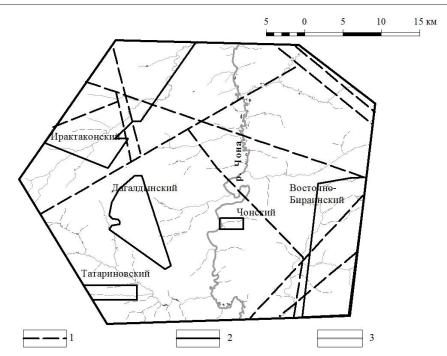


Рис. 1. Участки Верхнечонского МТПВ. I — тектонические нарушения; 2 — границы участков; 3 — реки.

Объектом эксплуатации является верхолено-литвинцевский водоносный комплекс. Водовмещающие породы приурочены к отложениям средне- и верхнекембрийского возраста (нерасчлененные верхоленская и илгинская свиты), представленным песчаниками, трещиноватыми алевролитами, аргиллитами, и нижне- и среднекембрийского возраста (литвинцевская свита), представленным карбонатами и мергелями.

Система ППД на ВЧНГКМ реализована следующим образом: скважины объединены в водозаборы, с которых вода поступает на установку подготовки артезианской воды (УПАВ), затем на УПН-1, где происходит отстаивание, нагрев, смешение с подтоварной водой. После вода направляется на блочную кустовую насосную станцию (БКНС), и затем через блоки гребенок осуществляется разводка по нагнетательному фонду.

Сложная организация системы ППД приводит к непостоянству работы водозаборных скважин из-за перемен давления как в самой сети низконапорных водоводов, протяженность которых составляет на ВЧНГКМ 93 км, так и по причине изменений добычи нефти в связи с корректировками профиля (соответственно и потребности в воде), приемистости нагнетательных скважин, особенностями функционирования УПАВ и БКНС, другими технологическими процессами. Данные по режиму работы водозаборов отличаются сложными зависимостями и их использование ограничено при переоценке запасов подземных вод. В таких случаях необходимо использование принципиально иного подхода к подсчету запасов.

В 2018 г. перед ООО «ТННЦ» была поставлена задача провести переоценку запасов подземных вод на действующих участках по промышленной категории. На тот момент запасами по категории В потребность в подземных водах для целей ППД была обеспечена менее чем наполовину. При этом проектные нагрузки были определены исходя из дебитов скважин, полученных при откачке на рельеф. После подключения скважин к системе водоводов их производительность снизилась по причине дополнительного давления, создаваемого в системе. Таким образом, при распределении проектных нагрузок имеет значение не максимальная производительность скважин, а фактическая, полученная в ходе анализа опыта эксплуатации всего водозабора. Откачки «на рельеф» при таком подходе необходимы для получения кондиционных параметров.

С учетом того, что часть скважин пробурена более десяти лет назад, откачки по ним были выполнены кратковременные и не всегда кондиционные, а гидродинамические параметры требуют подтверждения, было принято решение провести комплекс опытнофильтрационных работ.

Выполнение откачек на крупных месторождениях, эксплуатируемых с целью водоснабжения объектов с постоянной потребностью, часто представляется нетривиальной задачей в связи с невозможностью остановки фонда скважин. В случае с ВЧНГКМ сроки проведения опытно-фильтрационных работ (ОФР) были подобраны таким образом, чтобы они совпадали с плановыми профилактическими работами на фонде нефтяных и нагнетательных скважин, что минимизировало потери по добыче углеводородов вследствие дефицита воды в системе ППД.

Пригодность скважин для проведения ОФР оценивалась по следующим критериям: наличие пьезометра, высокая производительность, расположение в группе скважин, наличие наблюдательных скважин на вышележащий верхолен-илгинский горизонт. Для получения кондиционных параметров откачки проводились в воднокритичный период, однако работы не удалось выполнить в полном объеме по причине низких температур воздуха. Впрочем, результаты зимних опытов оказались сопоставимы с результатами исследований, проведенных повторно в летний период, что говорит о минимальном влиянии сезонности на гидрогеологический режим.

Рассмотрим результат одного из опытов на Восточно-Бираинском участке 2\*-Д, Верхнечонского  $MT\Pi B.$ Возмущающая скважина каптирующая нижнесреднекембрийский водоносный горизонт, расположена на расстоянии 7.5 м от скважины 2\*-Г, каптирующей средне- и верхнекембрийский водоносный горизонт. После начала откачки с дебитом 886 м<sup>3</sup>/сут уже через восемь минут уровень воды в наблюдательной скважине начал понижаться, через пять часов разница динамических уровней в скважинах 2\*-Д и 2\*-Г составляла не более 0.1 м (рис. 2).

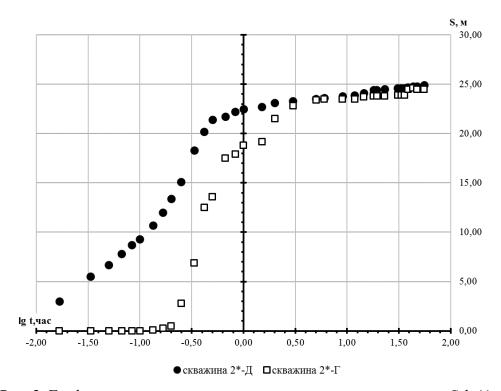


Рис. 2. График временного прослеживания уровня в координатах S-lg(t).

График наглядно демонстрирует отсутствие непроницаемой границы между средневерхнекембрийским и нижнесреднекембрийским водоносными горизонтами и единый характер напорного режима, что позволяет схематизировать их как единый водоносный

комплекс. Аналогичные результаты были получены и на других действующих водозаборных участках Верхнечонского МТПВ.

По результатам групповых и одиночных откачек величина водопроводимости при обработке результатов ОФР графоаналитическим методом составила от 73 до 1273 м²/сут, что характеризует пласт как весьма неоднородный. Значения пьезопроводности изменяются в диапазоне  $4.7 \cdot 10^4$ – $2.8 \cdot 10^7$  м²/сут. Результаты хорошо коррелируют со значениями водопроводимости, полученными в ходе ранее проведенных работ на Верхнечонском МТПВ, и в целом характерны для данного района.

Анализ данных режимных наблюдений не позволил получить гидродинамические параметры из-за неясного характера зависимостей дебита от понижений вследствие взаимовлияния скважин, но лег в основу обоснования проектных нагрузок. В качестве нагрузок были приняты значения объемов добычи, при которых не происходило значительных скачков динамического уровня. Прогнозные понижения при этом не превысили допустимых.

Допустимое понижение рассчитывалось по формуле:

$$S_{\pi on} = 0.5 \bullet m + H$$
,

где:  $S_{\text{Доп}}$  — допустимое понижение уровня, м; m — вскрытая мощность водоносного комплекса, м; H — напор над кровлей водоносного горизонта, м.

Рассмотрим расчет допустимых понижений при применении различных схематизаций гидрогеологических условий (таблица).

Сравнение результатов расчета допустимых понижений

Участок	Скважина	S <sub>Доп</sub> при схематизации с учетом непроницаемой границы, м	S <sub>Доп</sub> при схематизации с единым ВК,	Прогнозное понижение, м
Восточно-Бираинский	2**-Д	36	55	32.6
Дагалдынский	1-Б**	72	90	63.9

Вывод о существовании взаимосвязи между водоносными горизонтами верхоленоилгинской и литвинцевской свит подтвердился в ходе анализа результатов интерпретации геофизических исследований скважин (ГИС). Во всех предыдущих работах каждый из них рассматривался как отдельный, ограниченный сверху и снизу объект. Аналогичная природная гидрогеологическая модель была принята и на соседних лицензионных участках. Действительно, по данным ранее выполненных поисково-оценочных работ в северной части Верхнечонского МТПВ, где проводились работы с отбором керна, в подошве верхоленской свиты наблюдается загипсованность [1]. Однако в разрезе участков действующих водозаборов, расположенных на юго-востоке и западе месторождения, алевролиты и аргиллиты в подошве верхоленской свиты являются водоносными.

При подсчете запасов гидродинамическим методом, благодаря объединению водоносных горизонтов, по многим скважинам выявлен значительный запас понижения, который позволит в будущем, в случае увеличения потребности промысла в подземных водах, провести переоценку с возросшими нагрузками.

Кроме традиционного гидродинамического метода, при переоценке запасов был использован метод численного моделирования. В программном комплексе Visual ModFlow Flex 6.1 построена геофильтрационная модель Верхнечонского МТПВ, представленная двумя расчетными слоями: собственно изучаемого водоносного комплекса и проекции кровли ангарской свиты, находящейся на 70 м ниже фактических отметок структурного профиля, что необходимо для моделирования геомиграции. Для построения модели были

использованы сведения о конструкциях скважин, результаты режимных наблюдений, сведения о фильтрационно-емкостных свойствах пород, результаты лабораторных исследований воды. В ходе калибровки модели достигнутая степень расхождения расчетных и фактических данных не превысила 8.6 % при допустимом пороге 10 %. Привлечение метода геофильтрационного моделирования позволило ответить на некоторые вопросы тектонического строения района. При калибровочных итерациях было четко установлено наличие двух гидродинамических барьеров в пределах Восточно-Бираинского участка, выражающихся в резком перепаде напоров между водозаборными скважинами. Благодаря этому была снята неопределенность о характере разломов, ограничивающих Бираинский горст, подтверждено их существование и уточнена тектоническая структура участка. Ранее данная структура не учитывалась при оценке запасов, что приводило к искажению в понимании структуры потока подземных вод. Также дополнительный гидродинамический барьер был зафиксирован в пределах Дагалдынского участка. Ранее этот барьер в ходе геологоразведочных работ также не выявлялся.

Еще одной проблемой Верхнечонского МТПВ является спонтанное периодическое появление сероводорода в воде скважин, вскрывающих интервалы, близкие к кровле нижнекембрийских отложений (ангарской свиты). В результате моделирования геомиграции установлено, что наибольшие концентрации (от 2.0 до 5.5 мг/дм³ сероводорода) соответствуют Восточно-Бираинскому и Дагалдынскому эксплуатационным участкам. Это объясняется высокой эксплуатационной нагрузкой на первом и близостью кровли ангарской свиты на втором участке. Таким образом, прогнозные концентрации сероводорода в добываемой воде будут составлять от 0.5 до 5.5 мг/дм³, что обусловливает необходимость планирования мероприятий по водоподготовке.

#### Выводы

- 1. Главной особенностью геологического строения Верхнечонского МТПВ является отсутствие непроницаемой границы между нижнесреднекембрийским и средневерхнекембрийским водоносными горизонтами в западной и восточной части лицензионного участка, что удалось подтвердить в ходе анализа результатов интерпретации ГИС и проведения ОФР.
- 2. Одним из результатов объединения водоносных горизонтов стала возможность увеличения проектных нагрузок на водозаборные скважины.
- 3. Геофильтрационное моделирование в сложных гидрогеологических условиях позволяет сделать прогноз миграции отдельных химических веществ и показателей, уточнить тектоническую структуру района работ и характер влияния выделяемых объектов на гидродинамический режим.
- 4. По итогам описанных решений удалось выполнить переоценку с двукратным увеличением запасов подземных вод по категории В и успешно пройти государственную геологическую экспертизу отчета.

### Список литературы:

1. Шенькман Б.М. Зона свободного водообмена Верхнечонского нефтегазоконденсатного месторождения в начале этапа промышленной эксплуатации // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2014. № 7. С. 129–144.

# СТРУКТУРНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ОБЛАСТЕЙ НЕФТЕГАЗООБРАЗОВАНИЯ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-379-383

Черенева В.А.

ООО «Иркутская нефтяная компания», Иркутск, vchereneva@list.ru

**Аннотация.** В настоящей статье показана ведущая роль структурных особенностей осадочного чехла юго-востока Сибирской платформы в формировании ресурсов и состава подземных вод. Выявлены наиболее перспективные гидрогеологические структуры для целенаправленных поисково-разведочных работ на подземные воды различного целевого назначения.

Ключевые слова: подземные воды, месторождение подземных вод.

**Abstract.** In this article shows the leading role of the structural features of the sedimentary cover of the southeastern Siberian platform in the formation of resources and the composition of groundwater. The most promising hydrogeological structures for purposeful prospecting and exploration work on groundwater for various purposes have been identified.

Key words: ground water, ground water deposit.

Основные объекты нефтегазодобычи в Восточной Сибири приурочены к краевым структурам юго-востока Сибирской платформы. Организация их водоснабжения хозяйственно-питьевого и технологического назначения продолжает оставаться актуальной проблемой. Еще первые исследователи обращали внимание на сложность геологических условий региона, а также суровый климат и обширное развитие многолетней мерзлоты [1, 2].

Не отрицая возможности использования поверхностных водоемов и водотоков в качестве источников водоснабжения, следует отметить, что в условиях рассматриваемого региона им присущи следующие особенности, затрудняющие, а в ряде случаев исключающие такое использование: истощение поверхностного стока и переход в твердую фазу значительной его части в зимний период, когда мелкие реки и озера полностью перемерзают; относительно легкие возможности загрязнения поверхностных вод по сравнению с подземными; иногда большие технические трудности в каптаже и доставке воды потребителям; значительные объемы водопотребления для технологических нужд.

Отмеченные обстоятельства обусловливают целесообразность использования подземных источников для водоснабжения.

В структурно-тектоническом отношении регион расположен в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции, площадь которой имеет северо-восточное простирание. С юга антеклиза ограничена Ангаро-Ленской ступенью, с востока — глубоким Предпатомским региональным прогибом. На западе и северо-западе антеклиза граничит с Присаяно-Енисейской синеклизой.

В разрезе Непско-Ботуобинской антеклизы выделяются два структурных этажа: нижний, включающий архей-раннепротерозойский складчатый фундамент, и верхний, объединяющий палеозойско-четвертичный осадочный чехол. Кроме того, в пределах осадочной толщи палеозоя в разрезе отчетливо выделяются три этажа: подсолевой, солевой и надсолевой.

Подсолевой этаж распространяется от поверхности кристаллического фундамента до кровли осинского горизонта усольской свиты, где поверхность фундамента и подсолевых отложений полого воздымается к северу и северо-востоку с градиентом 2.7–3.5 м на 1 км.

Солевой этаж представлен галогенно-карбонатными породами усольской, бельской, булайской, ангарской и литвинцевской свит, имеет сложное строение, в частности обусловленное наличием в разрезе трапповых тел, а также неравномерным распределением солевых толщ в разрезе усольской, бельской и ангарской свит.

Комплекс осложнен многочисленными разрывными нарушениями. Отложения галогенно-карбонатного комплекса по сравнению с подсолевым комплексом в значительно большей степени осложнены тектоническими нарушениями северо-восточного простирания.

Надсолевой структурный этаж представлен палеозойскими наиболее дислоцированными отложениями осадочного чехла, объединенными в Ангаро-Ленский краевой прогиб (рис. 1, 2).

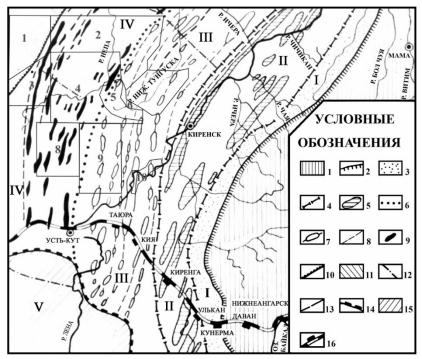


Рис. Схема тектонического строения Ангаро-Ленского краевого прогиба [3]. Геологические структуры: І – Прибайкальский синклинорий; ІІ – Лено-Киренгский антиклинорий; III – Марковско-Ичерская зона пологих, ундулирующих по простиранию валообразных поднятий; IV – Непская зона линейных антиклинальных структур; V – Илимо-Ленское плато. 1 — Байкальская горно-складчатая область; 2 — Байкало-Патомский краевой шов платформы; 3 – Прибайкальская зона линейных складок, перекрытых чехлом рыхлых отложений; 4 – границы Лено-Киренгского антиклинория; 5 – антиклинальные складки; 6 – граница Марковско-Ичерской зоны; 7 — пологие антиклинальные складки; 8 — оси валообразных поднятий Марковско-Ичерской зоны; 9 - гребневидные складки Непской зоны; 10 – юго-восточная граница Тунгусской синеклизы; 11 – Тунгусская синеклиза; 12 – разломы северо-западного простирания, инъецированные траппами; 13 – основные разломы северо-восточного простирания, выраженные на поверхности; 14 – граница Илимо-Ленского плато; 15 – Илимо-Ленское плато; 16 – трасса БАМа и железнодорожные станции. Цифры на рисунке (НГКМ и ЛУ): 1 – Верхненепский, 2 – Кийский, 3 – Верхненепский, 4 – Западно-Ярактинский, 5 – Ярактинское, 6 – Аянский (Западный), 7 – Аянский, 8 – Верхнетирский, 9 – Большетирский, 10 – Марковское.

Степень изученности гидрогеологических условий и освоения нефтегазовых месторождений в регионе различна. На ряде месторождений выполнены поисковооценочные и разведочные работы как на пресные воды хозяйственно-питьевого назначения, так и на технические, используемые для функционирования системы поддержания пластового давления (ППД) (Ичединские МТПВ, Гульмокское МТПВ, Гульмокское МППВ). На других месторождениях идет добыча углеводородов, ведется мониторинг подземных вод и оценивается прирост их запасов (Ярактинское МТПВ, Даниловское МТПВ, Даниловский УППВ). На ряде месторождений работы по оценке запасов подземных вод выполнены при непосредственном участии или под методическим руководством автора.

Необходимость дифференцированного анализа структурно-гидрогеологических условий верхнего и нижнего геоструктурных элементов разреза обусловлена, как было

отмечено, различной дислоцированностью и составом водовмещающих пород, напрямую определяющих условия локализации месторождений подземных вод.

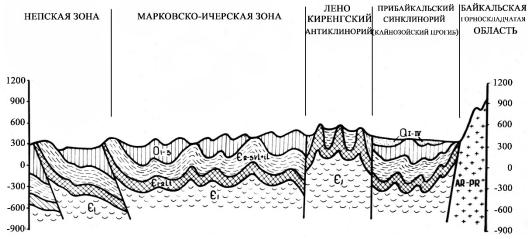


Рис. 2. Схематический геолого-структурный разрез [4].

Верхняя часть разреза, объединяемая в Ангаро-Ленский краевой прогиб, в гидродинамическом отношении представляет зону активного водообмена, в гидрогеохимическом — зону пресных вод, необходимых для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения.

В центральной части Ангаро-Ленского краевого прогиба с востока на запад, начиная от Байкало-Патомского краевого шва платформы, выделяются следующие структурнотектонические зоны (рис. 1): Прибайкальская (Кутимо-Чуйская) зона линейных складок, перекрытых мощным чехлом отложений четвертичного возраста; Лено-Киренгская зона линейных (гребневидных) складок; Марковско-Ичерская зона пологих ундулирующих по простиранию валообразных поднятий; Непская зона линейных антиклинальных структур.

В соответствии с принципами структурно-гидрогеологического районирования применительно к основным геоструктурным элементам Ангаро-Ленского краевого прогиба, а также анализом результатов гидрогеологических исследований, в пределах рассматриваемого региона выделяются следующие гидрогеологические бассейны (названия даны по структурно-тектоническим зонам прогиба): Непский, Марковско-Ичерский, Лено-Киренгский и Прибайкальский (в границах одноименного кайнозойского краевого прогиба) [5]. По разрезу выделенные структуры включают в себя наиболее дислоцированные отложения надсолевого подъяруса, к которым приурочена верхняя гидродинамическая зона.

Отличия в условиях распределения и формирования подземных вод в выделенных гидрогеологических структурах верхней зоны определяются, прежде всего, различным пространственным положением последних в общей структуре прогиба. Интенсивные поднятия, произошедшие в завершающий орогенный этап развития Байкальской области, привели к тому, что сопряженная с ней структура прогиба приобрела форму моноклинали с более крутым падением пород в восточной части. Структуры Прибайкальского и Лено-Киренгского бассейнов имеют более высокое гипсометрическое положение, обусловливающее выведение на поверхность кембрийских отложений, в отличие от структур внешнего борта прогиба. Это нашло отражение в более сложной и значительно более интенсивной дислоцированности пород верхней части разреза двух восточных структур.

В Марковско-Ичерском бассейне, расположенном на внешнем борту прогиба, характер складчатости совершенно иной. Здесь развиты пологие, занимающие значительные площади антиклинальные валы и сопряженные с ними синклинальные прогибы. Разрывные нарушения носят характер расколов; лишь в единичных случаях по ним отмечаются вертикальные перемещения пород (Марковский вал). Структуры Непского бассейна отличаются развитием локальных линейно вытянутых узких крутых антиклинальных складок, как правило, осложненных в осевой части продольными разломами. По разломам

отмечаются смещения пород, приводящие к выведению на дневную поверхность кембрийских отложений. Весь разрез ордовикских отложений (до 500 м) в пределах бассейнов обводнен; подземные воды трещинно-пластовые, в структурах обводненных разломов — трещинно-жильные. Водообильность пород контролируется складчатыми и разрывными дислокациями.

Верхняя гидродинамическая зона в различных структурах рассматриваемого региона сложена породами разного возраста. В Марковско-Ичерском и Непском бассейнах она представлена терригенно-карбонатными отложениями ордовика. В Непском бассейне дополнительное участие в строении верхней гидродинамической зоны в пределах антиклинальных валов принимают кембрийские отложения литвинцевской и верхоленской свит. Существенно различается и ее мощность: от 60–100 м в Прибайкальском и Лено-Киренгском бассейнах до 400 м и более в Марковско-Ичерском и Непском бассейнах.

Анализ структурных карт, составленных для отложений надсолевой толщи, позволяет выделить внутри вышеописанных гидрогеологических районов структуры более высокого порядка, которые контролируют распределение подземного стока. Наиболее показательным является Марковско-Ичерский бассейн, где мощная толща обводненных ордовикских отложений, наряду с подстилающим водоупором кембрийских пород верхоленской свиты, дислоцирована в серию антиклинальных валов и сопряженных синклинальных прогибов. Водоупорные породы вскрываются эрозионными системами крупных речных долин, то есть структуры расположены выше базиса дренирования, а степень водообильности отложений возрастает от валов к прогибам и далее в соответствии с ундуляцией шарнира. Максимальной локализацией подземного стока характеризуются участки погружения шарнира синклинального прогиба; при вскрытии таких участков долинами рек суммарные дебиты родников достигают 300 –500 л/с, а удельные дебиты скважин – десятков л/с.

Модули родникового стока изменяются от 0.17 (Марковский вал) до 2.30-2.65 л/с с  $1 \text{ км}^2$  (срединные синклинали Бочактинского и Марковского валов), достигая максимального значения в границах Рассохинского прогиба, равного 3.25 л/с с  $1 \text{ км}^2$ .

В ТКЗ утверждены запасы питьевых подземных вод для вахтового поселка Ярактинского НГКМ, в количестве 0.02 тыс.  $m^3$ /сут по категории В. Участку присвоено наименование Гульмокское МППВ. Позже была выполнена переоценка запасов в объеме 0.1 тыс.  $m^3$ /сут по категории  $C_1$ . Кроме того, в ТКЗ приняты запасы технических подземных вод в границах Ярактинского НГКМ в количестве 4.11 тыс.  $m^3$ /сут по категориям  $C_1$ + $C_2$ . Месторождение включает десять участков, из них два — с рассолами и солоноватыми водами и восемь — с пресными водами.

В нижней части разреза основным продуктивным подразделением, подземные воды которого используются для технологических целей в системе ППД, выступает литвинцевский водоносный комплекс нижнесреднекембрийского возраста. Водовмещающие породы представлены интенсивно трещиноватыми, кавернозными сульфатно-карбонатными породами (доломиты и известняки), вскрываются на глубинах 550 – 864 м. Подземные воды, как правило, обладают напором, величина которого изменяется от 62 до 135 м. Дебиты скважин изменяются в зависимости от коллекторских свойств и мощности водоносного комплекса от 2.54 до 52.1 л/с и более при понижении от 23 до 129.5 м соответственно. Удельный дебит составляет 0.09–1.19 л/с. Коэффициент водопроводимости изменяется от 8.5 до 62 м²/сут.

Питание комплекса происходит за счет атмосферных осадков в местах выхода отложений свиты на поверхность и подземных вод нижележащих отложений по зонам тектонических нарушений. Разгрузка осуществляется в виде родников на участках вскрытия пород долинами рек и по зонам тектонических нарушений.

Состав соленых вод и рассолов комплекса хлоридный натриевый с минерализацией от 11.0 до 156.7 г/л и более, что связано с подтоком по тектонически ослабленным зонам из нижележащих толщ высокоминерализованных рассолов. Температура подземных вод водоносного комплекса у поверхности земли 3–7 °C, пластовые температуры 12–19 °C.

Примером утвержденных запасов подземных вод являются шесть участков Ярактинского МТПВ в количестве 49.48 тыс. м<sup>3</sup>/сут. По сложности гидрогеологических условий месторождение отнесено ко 2-й группе.

Результаты выполненных исследований показывают, что наиболее благоприятными условиями для формирования месторождений подземных вод, качество которых отвечает требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования...», обладают гидрогеологические структуры Марковско-Ичерского антиклинального поднятия. Сопряженные с антиклинальными валами синклинальные прогибы являются здесь своего рода структурными ловушками подземных вод, поскольку выполняющие их породы ордовика подстилаются водоупорными кембрийскими отложениями ( $\mathcal{C}_{2-3}$ vl), имеющими тот же характер складчатости. Возможность формирования месторождений подземных вод реально существует на участках синклинальных прогибов, где их шарнир в результате ундуляции наиболее погружен. Этим частям прогибов свойственны максимальные значения дебитов родников (в местах их пересечения эрозионными системами), модулей родникового стока, а также удельных дебитов скважин.

В пределах Непского сводового поднятия благоприятными условиями для формирования месторождений кондиционных подземных вод обладают структуры северозападных запрокинутых крыльев крутых антиклинальных валов.

Задачи дальнейших структурно-гидрогеологических исследований в рассматриваемом регионе сводятся к следующему:

- 1. Продолжение среднемасштабного гидрогеологического картографирования, прежде всего, в пределах Непско-Ботуобинского сводового поднятия, в недрах которого сосредоточены большие запасы нефти и газа. Здесь же разведано первое на востоке страны месторождение калийных солей.
- 2. Поиски и разведка дополнительных источников хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения. При этом положительные результаты будут достигнуты лишь в том случае, когда определению мест заложения поисково-разведочных скважин будет предшествовать детальный структурно-гидрогеологический анализ.
- 3. Использование в технологических целях попутно добываемых пластовых вод после их предварительной подготовки с применением специальных ингибиторов для уменьшения коррозионной активности и солеотложений.
- 4. Организация охраны подземных вод как составной части комплексной проблемы охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов. При этом гидросферный базис имеет ведущее значение, поскольку является основой как жизнеобеспечения, так и функционирования всех отраслей производства.

## Список литературы

- 1. Анциферов А.С., Артеменко А.С., Зекова О.В. и др. Гидрогеология Иркутского нефтегазоносного бассейна. Иркутск: Вост. Сиб. книжн. изд-во, 1971. 124 с.
- 2. Вахромеев А.Г. и др. Краевые прогибы юга Сибирской платформы и методология их геологического изучения с целью наращивания минерально-сырьевой базы углеводородов на территории Иркутской области // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2016. № 4 (28). С. 75–83.
- 3. Жарков М.А., Кузнецов Г.А. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности центральной части Ангаро-Ленского краевого прогиба // Новые данные по геологии, нефтеносности и полезным ископаемым Иркутской области. М., 1964. С. 3–54.
  - 4. Степанов В.М. Введение в структурную гидрогеологию. М.: Недра, 1989. 229 с.
- 5. Черенева В.А., Диденков Ю.Н. Структурно-гидрогеологическое районирование Ангаро-Ленского краевого прогиба Сибирской платформы // Материалы международной научно-технической конференции. Иркутск, 2020.

## V. НОВЫЕ МЕТОДЫ В ГИДРОГЕОДИНАМИКЕ И ГИДРОГЕОХИМИИ

# ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В РАЙОНАХ РАЗВИТИЯ ПЛАСТОВ С ДВОЙНОЙ ПОРИСТОСТЬЮ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-384-388

Аузина Л.И.<sup>1</sup>, Ланкин Ю.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, <sup>2</sup>Иркутский территориальный государственный центр мониторинга геологической среды, lauzina@mail.ru

Аннотация. На основе анализа результатов полевых исследований, проведенных на месторождениях подземных вод, расположенных в различных тектонических структурах Восточной Сибири, обосновано наличие двойной пористости в водовмещающих отложениях зоны свободного водообмена региона, что обусловлено напряжениями, возникающими при формировании внутриконтинентального Байкальского рифта. На основании особенностей структурно-тектонических и гидрогеологических условий предложена оптимизация геологоразведочных работ, методики проведения и обработки опытно-фильтрационных исследований на территориях развития разломно-блоковых структур

Ключевые слова: двойная пористость, разломно-блоковая структура.

**Abstract.** Analysis of field study results made it possible to identify layers with double porosity in groundwater deposits located in various tectonic structures of Eastern Siberia. The research was done in the aquifers of the upper hydrodynamic zone. The peculiarities of the structural and tectonic conditions of the region are caused by the stresses arising during the Baikal rift system formation. Optimization of geological exploration work, methods and processing of test pumping in the territories of development of fault-block structures

Key words: double porosity, fault-block structure.

Объектами исследований являются месторождения подземных расположенные в различных тектонических структурах Восточной Сибири. В качестве примеров рассматриваются Бодайбинское, Тымпучиканское, Зазинское МПВ. Основные структуры, к которым приурочены месторождения, и связанные с ними особенности формирования коллекторов подземных вод (ПВ) объединены едиными напряжениями, возникающими при формировании внутриконтинентального Байкальского рифта и сочетающими региональные С3-ЮВ растяжения по усредненному азимуту 310-330° с субширотной левосдвиговой компонентой [1]. Значительная неоднородность тектонического строения земной коры региона обусловлена наличием в ней разнообразных структур в виде продуктов магматической деятельности в совокупности с разломными и складчатыми преимущественно северо-западного, субмеридионального и восточного простирания [2]. Возрастной спектр заложения этих структурных и магматических комплексов весьма широк – от раннего протерозоя до кайнозоя, при этом последний включает в себя период рифтогенной тектономагматической активизации [3]. Разнообразие и масштабное развитие разломной тектоники создали предпосылки для формирования двух типов коллекторов: межблоковых (тектоническая трещиноватость) и внутриблоковых (тип коллектора зависит от исходной геологической структуры).

Зазинское МПВ находится в Зазинской межгорной впадине Байкало-Витимской складчатой области [4], представляющей собой глубокий грабен в кристаллическом фундаменте и сложенной верхнемезозойскими терригенно-осадочными отложениями. Впадина сформировалась в несколько этапов, включающих образование Зазинского прогиба в результате внутриконтинентального процесса рифтообразования и ее дальнейшего заполнения осадочно-вулканогенными породами и последующее формирование основных

структурно-тектонические особенностей района в ходе тектонических подвижек с сопутствующим осадконакоплением в раннемеловое время. Морфологически впадина представляет собой линейно вытянутую депрессию, обрамленную невысокими горными хребтами Зусы и Витимского плоскогорья (рис 1). Выделение блоково-разломной структуры на участке базировалось на результатах интерпретации площадных геофизических исследований: аэромагниторазведки, давшей возможность выявить основные разломы северо-восточного и северо-западного простирания, а также ЭМЗ-ВП (Давыденко Ю.А., 2020 г.), позволившей выделить более мелкие дизъюнктивные структуры второго и третьего порядка.

Зоны тектонической трещиноватости подтверждены результатами бурения поисковых скважин в 1982 и в 2020 гг. Повышенная водообильность отложений нижнего мела соответствует зонам тектонических разрывов (таблица).

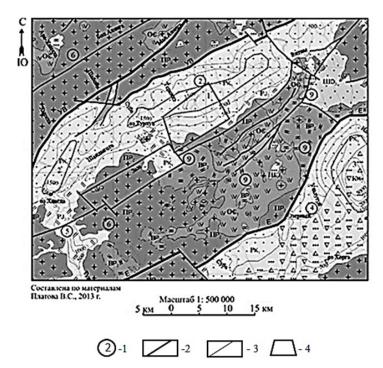


Рис. 1. Структурно-тектоническая карта района Зазинского МПВ. I — мезозойские рифтогенные впадины, выполненные осадочными образованиями: 2 — Зазинская, 4 — Еравнинская; прогибы: 5 — Индола-Тулдунский; 6 — Ангаро-Витимский батолит, 9 — Еравнинский провес кровли батолита; разрывные нарушения: 2 — главные разломы (УВ — Удино-Витимский, E — Еравнинский); 3 — прочие разломы, неустановленной кинематики; 4 — участок Зазинского МПВ.

Тымпучиканское МПВ (Западная Якутия) приурочено к зоне развития двух крупных разновозрастных платформенных структур І порядка [4]: Тунгусской синеклизы и Ангарорайона Вилюйского юрского наложенного прогиба. Структура состоит сложнодислоцированного метаморфизованного дорифейского фундамента, слагающего цоколь платформы, и в различной степени дислоцированного осадочного чехла. Участок находится в пределах Непского свода, представляющего собой сложно построенную положительную структуру общего северо-восточного простирания. Более детальное структурно-тектоническое строение верхней гидродинамической зоны района Тыпучиканского МПВ выполнено по результатам электроразведочных работ (ЗСБ, Агафонов Ю.А., 2013г.) На территории преобладают разрывные нарушения северо-западного, северовосточного и субмеридионального направлений, в результате развития которых четко просматривается разломно-блоковая структура площади исследований, что подтверждается и результатами проведенных опытно-фильтрационных исследований (ОФИ) [5]. Все разломы имеют крутопадающий, практически вертикальный характер. Отличительной чертой северо-восточного дизьюнктива является его прямолинейность и выдержанность по простиранию. Результаты неотектонических движений подчеркиваются особенностями современного рельефа, представляющего собой сочетание денудационных возвышенностей и аккумулятивных низменностей.

Еще одним примером пласта с двойной пористостью является комплекс протерозойских пород, в пределах которых проводились поисковые работы для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения населения г. Бодайбо. Бодайбинский участок ПВ расположен в Байкало-Патомском эпиплатформенном раннепалеозойском поднятии [4], сложенном рифейскими перикратонными комплексами. В плиоцене на фоне общего сводового воздымания господствующее значение приобрели вертикальные дифференцированные перемещения блоков по разломам. В поздненеоплейстоценовоеголоценовое время продолжилось общее поднятие и дифференциация ранее созданных активизация разломов северо-западного простирания, формированию сложной блоково-мозаичной структуры [6], подчеркивающейся рисунком гидросети региона. Здесь, на одном из поисковых участков вблизи р. Витим, наземными геофизическими исследованиями была установлена система зон дробления разломов, сформированных вдоль и вкрест простирания долины реки, что обусловило блоковое строение территории.

На всех описанных объектах, объединенных наличием разломно-блоковой структуры, связанной с тектоническим развитием территории, при проведении ОФИ была применена нестандартная методика. Для получения более адекватной информации о фильтрационных параметрах водовмещающих пород в гидрогеологических скважинах проводилась серия экспресс-откачек для раскольматации зон тектонической трещиноватости, «раскачки» водоносного подразделения и привлечения дополнительного питания из зон разломов. Опыты осуществлялись при максимальной мощности водоподъемного оборудования длительностью от 0.5 до 5.0 часов с последующим восстановлением уровня ПВ. Некоторые результаты экспресс-опытов приведены в таблице.

Результаты опытно-фильтрационных работ в поисковых скважинах (Зазинское МПВ)

№ скв	No	Продолжительность,	Дебит	Понижение S, м	Удельный дебит
	прокачки	мин	Q, л/c		q=Q/S, л/c*м
	1	100	1	30	0.03
	2	100	1.5	62	0.024
	3	100	2	11.6	0.17
9a	4	300	2	11.6	0.17
	5	180	2.2	9.45	0.23
	6	10	3	13	0.23
	7	10	3	13	0.23
	8	10	7	13	0.54
	1	30	9.4	24.09	0.39
	2	30	9.76	23.41	0.41
9c1	3	30	10.1	23.16	0.43
	4	30	10.25	22.87	0.45
	1	100	10.96	19.6	0.1
9ю	2	100	11.3	21.4	0.13
	3	100	10.67	19.32	0.55
	4	150	10.18	19.21	0.53
7a	1	30	2.67	25.25	0.11
	2	30	3.5	30.86	0.11
	3	30	3.6	32.34	0.11
3a	1	30	2.72	26.43	0.10
	2	30	2.72	26.02	0.10
	3	30	2.71	25.99	0.10
	4	180	2.73	26.26	0.10

Из представленной таблицы ясно видно, что скважины 9а, 9с1и 9ю пробурены в хорошо проницаемых межблоковых зонах (зонах разломов), поскольку с каждой прокачкой удельный дебит возрастал в связи с раскольматацией трещин, а скв. 7а и 3а находятся в слабоводообильных породах внутрибокового пространства, где удельный дебит, несмотря на проведенные экспресс-опыты, остался на прежнем уровне.

Вследствие незначительной ширины оперяющих разломов второго и третьего таксономических уровней на первых этапах ОФИ происходит существенное понижение уровня ПВ, при этом квазистационарный режим формируется в течение длительного времени (3-5 сут и более) или не достигается в рамках проведения опыта, что предопределяет предпочтительное использование результатов восстановления уровня ПВ для оценки фильтрационных параметров, при этом графики восстановления наглядно отражают наличие двойной пористости в водовмещающих отложениях и позволяют оценить водопроводимость как разломных зон, так и пород, слагающих внутриблоковые структуры (рис. 2). Анализ графика восстановления уровня позволяет сделать вывод, что откачка выполнялась в условиях пласта с двойной пористостью. Пологая часть графика характеризует фильтрационные показатели зоны дробления, а крутая – окружающих, менее пород внутриблокового проницаемых, пространства. Аналогичная закономерность проявлялась и по другим поисковым скважинам.

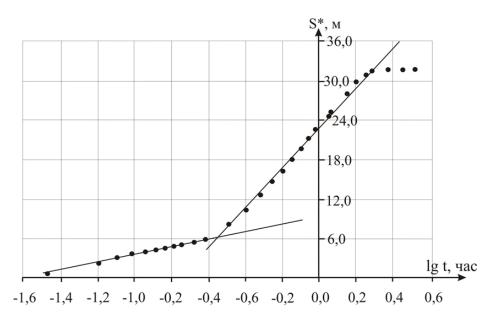


Рис. 2. График восстановления уровня воды из гидрогеологической скважины (Бодайбинское МПВ).

Полученные результаты позволяют на поисково-оценочном этапе *оптимизировать* геологоразведочные работы, методику проведения и обработки  $O\Phi P$  на территориях развития разломно-блоковых структур и водовмещающих пластов с двойной пористостью.

- 1. Выполнение площадной геофизики для выделения зон дробления (хорошие результаты получены при использовании методов ЗСБ и ЭМЗ-ВП).
- 2. Бурение гидрогеологических скважин в пределах выделенных тектонических зон второго и третьего порядка и проведение в пределах их развития серии кратковременных экспресс-опытов с максимальной производительностью водоподъемного оборудования с целью раскольматации зон трещиноватости.
- 3. Проведение откачек с последующей их обработкой по восстановлению уровня ПВ или методом Хорнера.

#### Список литературы

- 1. Гончаров М.А., Фролова Н.С. Конвективная эволюция перехода от пассивного рифтогенеза к активному // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы. Т. 1. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. С. 86–89.
- 2. Гилева Н.А., Мельникова В.И. Особенности развития крупных сейсмических активизаций в Северном Прибайкалье в 1997–2012 годах // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы. Т. 1. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. С. 74–79.
- 3. Замараев С.М., Васильев Е.П., Мазукабзов А.М. и др. Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Наука, 1979. 125 с.
- 4. Геологическое строение СССР и закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 4. Сибирская платформа / Н.С. Малич, В.Л. Масайтис, В.С. Сурков. Л.: Наука, 1987. 448 с.
- 5. Auzina L.I., Parshin A.V. System-integrated GIS-based approach to estimating hydrogeological conditions of oil-and-gas fields in Eastern Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 33, Number 1, March P. 12060–12065(6).
- 6. Окороков В.Г., Четвертаков И.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Муйская серия. Лист О-50-ХХХІІ. Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 201 с.

## ГИДРОГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МОДЕЛИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-389-393

#### Болдина С.В.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Петропавловск-Камчатский, boldina@emsd.ru

Аннотация. По данным многолетних прецизионных наблюдений в двух скважинах, различающихся конструкцией, свойствами вскрытых водовмещающих пород и составом порово-трещинного флюида, с использованием моделирования и расчетных методов исследованы разнообразные эффекты в изменениях уровня/давления подземных вод при подготовке и реализации сильных землетрясений. Для каждой скважины выполнена морфологическая типизация гидрогеосейсмических эффектов (ГГСЭ) в изменениях уровня/давления воды.

**Ключевые слова**: скважина, землетрясение, уровень/давление воды, Камчатка.

**Abstract**. Based on the data of long-term precision observations in two wells differing in construction, properties of opened water-bearing rocks and composition of pore-fracture fluid, various effects in changes of the level/pressure of groundwater during the preparation and implementation of strong earthquakes were studied using modeling and calculation methods. For each well, morphological typification of hydrogeoseismic effects (HGSE) in changes of water level/pressure was performed.

Keywords: well, earthquake, water level/pressure, Kamchatka.

#### Введение

Уровнемерные наблюдения в скважинах используются для изучения современных сейсмотектонических процессов в флюидонасыщенной геосреде сейсмоактивных регионов вследствие чувствительности давления подземных вод к изменениям напряженнодеформированного состояния водовмещающих горных пород при развитии в них квазиупругой деформации и трещинной дилатансии на стадиях подготовки землетрясений, образования их магистральных разрывов и воздействия сейсмических волн [4, 5]. В результате многолетних уровнемерных наблюдений КФ ФИЦ ЕГС РАН были обнаружены разнообразные эффекты в изменениях уровня/давления подземных вод при подготовке и землетрясений, В т. ч. гидрогеодинамические предвестники косейсмические скачки давления при образовании разрывов в очагах землетрясений (КС) и гидрогеосейсмические вариации при вибрационном воздействии сейсмических волн от местных и сильных телесейсмических событий (ГГСВ) [1, 5, 7].

В работе основное внимание уделялось оценке свойств наблюдательных скважин в качестве «датчиков» изменения напряженно-деформированного состояния геосреды при сейсмотектонических процессах, при барометрических, приливных и других природных и техногенных воздействиях [5, 7]. Кроме этого, регистрация эффектов сейсмических волн в уровня/давления воды скважинах позволяет получать изменениях В экспериментальные данные о вибрационном воздействии на состояние флюидонасыщенной сейсмоактивных регионов особенностях И возникновения развития гидрогеодинамических процессов в системе «скважина – водовмещающая Исследование откликов природно-технических систем «скважина – водовмещающая порода» на изменение напряженно-деформированного состояния геосреды на стадиях подготовки и реализации сильных землетрясений проводилось на примере скважин, различающихся локальными гидрогеологическими условиями и оборудованных современными средствами регистрации параметров подземных вод в диапазоне периодов от 0.05 с до месяцев и лет.

### Исходные данные и методика исследования

В 1997–2017 гг. в скв. ЮЗ-5 (53.17° с.ш., 158.41° в.д., открытый интервал 310–800 м, водовмещающие породы представлены сланцами и алевролитами, уровень на глубине 1.5 м, вода пресная) и в скв. Е-1 (53.26° с.ш., 158.48° в.д., открытый интервал 625–647 м, туфы, уровень на глубине 27 м, вода слабоминерализованная с газом метаново-азотного состава) проводились измерения уровня воды и атмосферного давления с периодичностью 5 мин с

(ООО Полином, использованием оборудования Кедр ДМ г. Хабаровск) Обеспечивалась точность регистрации вариаций уровня воды  $\pm 0.1$  см, атмосферного давления  $\pm 0.1$  гПа. В [1, 3, 5, 7] представлены данные о строении скважин, упругих и фильтрационных свойствах водовмещающих пород, закономерностях гидрогеодинамического режима зарегистрированных гидрогеодинамических предвестниках, косейсмических скачках уровня/давления воды и ГГСВ при сильных с  $M_{\rm W} > 6.8$ , местных и телесейсмических землетрясениях.

В сентябре 2017 — мае 2019 г. в скв. ЮЗ-5 проводилась регистрация давления на глубине 5.6 м с частотой 10 и 40 Гц с использованием оборудования фирм Keller, Швейцария (датчик давления PAA 36XW) и Cambell, США (регистратор CR6); получены высокочастотные записи ГГСВ при трех телесейсмических землетрясениях с  $M_{\rm w}=7.0$ —8.1 в районах Аляски и Мексики [2, 7].

В 2018 г. в скв. ЮЗ-5 был установлен комплект аппаратуры производства фирмы Keller, Швейцария (датчик 36XiW CTD, регистратор GSM-2) для измерения давления подземной воды на глубине 8 м ниже уровня. С использованием этого оборудования получены непрерывные записи давления с периодичностью 1 мин с октября 2018 г. по август 2019 г. В записях давления были зарегистрированы ГГСВ при местных землетрясениях с M > 4 и при телесейсмических событиях 30 ноября и 20 декабря 2018 г. [2].

С 2019 г. в скв. ЮЗ-5 проводится регистрация давления воды на глубине 8 м с частотой 0.01, 1 и 20 Гц с использованием оборудования фирм Keller, Швейцария (датчик давления РАА 36XW) и Cambell, США (регистратор CR1000). В скв. Е-1 дополнительно к оборудованию Кедр ДМ установлен комплект аппаратуры производства фирмы Keller, Швейцария (датчик 36XiW CTD, регистратор GSM-2) для измерения давления воды на глубине 6 м с периодичностью 2 мин.

## Эффекты вибрационного воздействия сейсмических волн в изменениях уровня воды (ГГСВ)

В скв. ЮЗ-5 по морфологическим особенностям вариаций уровня воды выделены четыре типа ГГСВ при воздействии сейсмических волн из очагов местных и удаленных землетрясений с  $M_{\rm w}=6.8$ –9.1 на эпицентральных расстояниях от 80.0 до 14.6 тыс. км [5, 7]: колебания (I), наложение колебаний и кратковременного (до десятков часов) повышения (II), кратковременные повышения (III), длительное (1.5–3.0 мес.) понижение уровня воды (IV). Было установлено, что проявление выделенных типов ГГСВ определяется параметрами землетрясений – соотношением магнитуды  $M_{\rm w}$  и эпицентрального расстояния  $d_{\rm e}$  землетрясения, а также величинами удельной плотности энергии в сейсмической волне e и ее максимальной скорости  $V_{\rm m}$  в районе скважины [5, 7].

На примере скв. ЮЗ-5 рассмотрены гидрогеодинамические процессы формирования четырех основных типов ГГСВ в системе «скважина – водовмещающая порода» с использованием моделирования на основе известных математических моделей и данных о свойствах водовмещающих пород и строении скважины, а также даны количественные критерии их инициации и развития [5, 7]:

- колебания уровня/давления воды (типы I и II) с амплитудами, превышающими вертикальные смещения поверхности Земли, возникают вследствие динамической деформации водовмещающих пород и усиления вариаций давления подземной воды в стволе скважины при прохождении низкочастотных поверхностных волн с периодами, соответствующими резонансной частоте скважины;
- повышение уровня/давления в течение десятков минут часов (типы II и III) вызывается локальным ростом давления при кратковременном нарушении стационарных условий течения воды вблизи ствола скважины;
- местные сильные землетрясения, генерирующие высокочастотные объемные волны и вызывающие сотрясения в районе скважины  $I_{\rm msk-64} \geq 5$  баллов, сопровождаются длительным (месяцы) понижением уровня/давления (тип IV). Такой тип ГГСВ возникает при наличии в радиусе до первых сотен метров от скважины неоднородностей строения

водовмещающих пород («гидрогеологических окон»), проницаемость которых при сотрясениях увеличивается и сопровождается понижением давления подземных вод с амплитудами 0.03–0.10 бар. Наличие таких неоднородностей с повышенной проницаемостью геологической среды подтверждено полевыми исследованиями. В ССЗ направлении от скважины на расстоянии 300–1000 м обнаружены аномально высокие концентрации объемной активности радона в подпочвенном воздухе.

Прослежено закономерное изменение типов ГГСВ от I до IV с увеличением максимальных амплитуд и частоты сейсмических волн по записям на ближайшей сейсмостанции РЕТ [7].

## Гидрогеодинамические предвестники (ГП)

ГП имеют практическое значение для оценки времени возникновения сильных землетрясений на Камчатке. Наиболее примечательные данные о ГП получены для скв. Е-1, в которой выделены два вида ГП перед землетрясениями с  $M_{\rm w} \ge 6.0$ . Заблаговременность их проявления составляет сутки – первые месяцы (ГП I) (рис. 1) и первые годы (ГП II) [5, 7]. Указанные предвестников используются виды В комплексе другими сейсмопрогностическими данными при оценке опасности возникновения землетрясения в Камчатском крае. По заключениям Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений (КФ РЭС), с использованием ГП I и ГП II (с 2012 г.) были успешно спрогнозированы шесть землетрясений 2004—2016 гг. с  $M_{\rm w} = 5.3-7.2$ , в том числе землетрясения 28.02.2013 г,  $M_{\rm w} = 6.9$  и 30.01.2016 г.,  $M_{\rm w} = 7.2$  [8].

В скв. ЮЗ-5 ГП проявлялись в течение недель — первых месяцев в нарушении среднемноголетнего сезонного тренда уровня воды [1, 5] перед Кроноцким землетрясением 5 декабря 1997 г.,  $M_{\rm w}=7.8$ , перед землетрясением 28 февраля 2013 г.,  $M_{\rm w}=6.8$ , и перед Жупановским землетрясением 30 января 2016 г.,  $M_{\rm w}=7.2$  (рис. 2).

На стадиях подготовки землетрясений 28 февраля 2013 г. и 30 января 2016 г. были также обнаружены эффекты уменьшения величины регрессионного коэффициента связи между вариациями уровня воды и атмосферного давления, а также уменьшения амплитуды приливной волны  $M_2$  и увеличение фазового сдвига между откликами уровня воды на приливную деформацию. С использованием выявленных тенденций в изменениях барометрического и приливного откликов уровня воды сделаны оценки изменений упругих и фильтрационных свойств водовмещающих пород на стадиях подготовки сильных землетрясений [6].

## Косейсмические скачки при образовании разрывов в очагах землетрясений (КС)

Косейсмические скачки уровня/давления воды, фиксируемые при образовании разрывов в очагах местных сильных землетрясений, рассматриваются в качестве калибровочных сигналов, свидетельствующих о степени чувствительности наблюдательной скважины к квазиупругим изменениям напряженно-деформированного состояния среды [1, 5].

На рис. 2 E представлено косейсмическое повышение уровня воды в скв. ЮЗ-5 при Жупановском землетрясении 30.01.2016 г. Образование разрыва в очаге землетрясения сопровождалось скачком повышения уровня воды с амплитудой 7.3 см, что соответствует объемной деформации сжатия водовмещающих пород  $-4.5 \cdot 10^{-8}$  [1]. Оценка косейсмической деформации по уровнемерным данным согласуется с величиной объемной косейсмической деформации по модели протяженного дислокационного источника с параметрами подвижки по механизму СМТ Жупановского землетрясения ( $-4.6 \cdot 10^{-8}$ ). Соответствие полученных величин подтверждает хорошие деформометрические свойства скв. ЮЗ-5 и перспективность ее использования в системе геофизического мониторинга современных геодинамических процессов и прогнозирования сильных землетрясений в Камчатском регионе [1, 4].

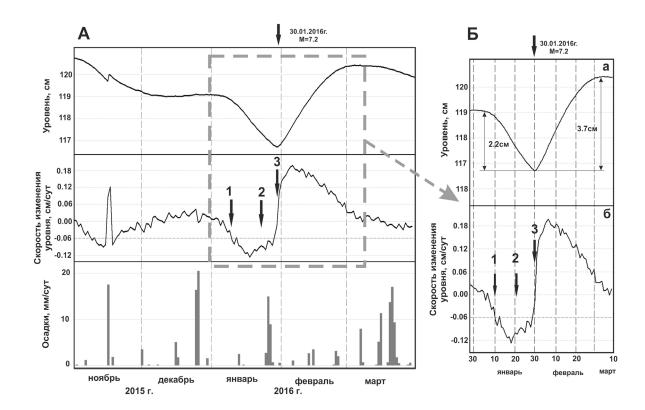


Рис. 1. Изменения уровня воды в скв. Е-1 в период Жупановского землетрясения  $30.01.2016 \, \Gamma$ .,  $M_W = 7.2$ : A- изменения уровня воды и его среднесуточной скорости с ноября  $2015 \, \Gamma$ . по март  $2016 \, \Gamma$ . в сопоставлении с атмосферными осадками; землетрясение показано стрелкой. На графике среднесуточной скорости изменения уровня воды цифрами показаны: 1-10 января — начало проявления гидрогеодинамического предвестника, 2-21 января — дата подачи прогнозного заключения в Камчатский филиал Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, 3-30 января — Жупановское землетрясение; пунктирной линией показано пороговое значение скорости понижения уровня воды  $-0.06 \, \text{см/сут}$ ; жирной пунктирной линией выделен фрагмент изменений уровня воды, представленный на рис. E: а — изменения уровня воды с E0 декабря E10 г. по E10 марта E10 г., включающие гидрогеодинамический предвестник и постсейсмическое повышение, E10 изменение среднесуточной скорости вариаций уровня воды в сопоставлении с ее пороговой величиной E10 см/сут.

## Заключение

Морфологические особенности проявления ГГСЭ в изменениях уровня/давления воды в различных скважинах на стадиях подготовки и реализации сильных землетрясений определяются локальными гидрогеологическими условиями – пороупругими и фильтрационными свойствами водовмещающих пород, степенью неоднородности их строения, а также наличием свободного газа в составе подземной воды.

Совокупность данных о параметрах землетрясений (магнитуда, эпицентральное расстояние, интенсивность сотрясений и др.) и количественных характеристик сейсмических волн в районе скважины по записям на ближайшей сейсмостанции является комплексным показателем интенсивности сейсмического воздействия на состояние системы «скважина – водовмещающая порода» и определяет морфологическое многообразие вибрационных ГГСВ в отдельной скважине.

Выделенные гидрогеодинамические предвестники перед местными сильными землетрясениями и косейсмические скачки давления при образовании разрывов в их очагах могут использоваться в системе геофизического мониторинга и прогнозирования землетрясений в Камчатском регионе.

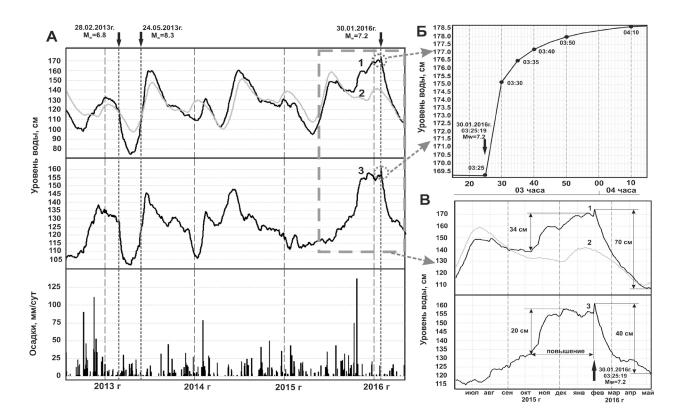


Рис. 2. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скв. ЮЗ-5: A – изменения уровня воды в июле 2012 г. – мае 2016 г. в сопоставлении с осадками и землетрясениями с  $M_{\rm w} \ge 6.5$  (показаны стрелками): 1 – среднечасовые данные наблюдений с компенсированными баровариациями; 2 – сезонные вариации уровня воды совместно с линейным трендом; 3 – остатки в изменениях уровня воды после компенсации годовой сезонности и тренда: жирным пунктиром обозначен фрагмент графиков в период подготовки и реализации Жупановского землетрясения, см. рис. B); B – косейсмическое повышение уровня воды после вступления сейсмических волн (03:25); B – предвестниковые и постсейсмические изменения уровня воды в период подготовки и реализации Жупановского землетрясения.

### Список литературы

- 1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г.,  $M_w$ =7.2, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С. 863–880. doi: 10.5800/GT-2017-8-4-0321.
- 2. Болдина С.В., Копылова Г.Н., Чубарова Е.Г. Гидрогеодинамические эффекты сильных землетрясений 2017—2018 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. [Электронный ресурс]: Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября 7 октября 2019 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 27—31.
- 3. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Смирнов А.А., Чубарова Е.Г. Опыт регистрации вариаций уровня и физико-химических параметров подземных вод в пьезометрических скважинах, вызванных сильными землетрясениями (на примере Камчатки) // Сейсмические приборы. 2016. № 4. Т. 52, С. 43–56. doi: 10.21455/si2016.4-4.
- 4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20. doi: 10.31857/S0205-9614201923-20.
- 5. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2019. 144 с.
- 6. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Скважинные уровнемерные наблюдения в системе геофизического мониторинга на Камчатке // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. [Электронный ресурс]: Труды Седьмой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября 7 октября 2019 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 72–77.
- 7. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Эффекты сейсмических волн в изменениях уровня воды в скважине: экспериментальные данные и модели // Физика Земли. 2020. № 4. С. 102–122. doi: 10.31857/S0002333720030035.
- 8. Kopylova G., Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study From the Kamchatka Peninsula // Front. Earth Sci. 2020. 8:576017. doi: 10.3389/feart.2020.576017.

## О ГИДРОГЕОДИНАМИКЕ ПЛАНЕТЫ И РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ УРАЛА И ПРЕДУРАЛЬЯ)<sup>1</sup>

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-394-399

Гаев А.Я.<sup>1</sup>, Куделина И.В.<sup>2</sup>, Алферов И.Н.<sup>3</sup>, Килин Ю.А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Оренбург, gayev@mail.ru <sup>2</sup>Институт экологических проблем гидросферы при Оренбургском госуниверситете, Оренбург, maneb-or@mail.ru

 $^3$ Институт экономики Уральского отделения РАН, Екатеринбург, alferov.in@uiec.ru  $^4$ Институт карстоведения при Пермском научно-исследовательском госуниверситете, Пермь

Аннотация. До сих пор представления о гидрогеодинамике планеты и регионов слабо связаны и препятствуют развитию прорывных технологий. Открытие «сверхводы» подтвердило мысль В.И. Вернадского о том, что «вода занимает особое положение и стоит особняком в истории нашей планеты». С.Л. Шварцев назвал это постулатом В.И. Вернадского. В воде в надкритическом состоянии формируются нефть, газ и другие полезные ископаемые. В нашем регионе выделено 11 этапов перестройки структурно-гидрогеологического плана и созданы гидрогеологические этажи и подэтажи. При обновлении разломов обновляются связи и многократно обмениваются воды фундамента и чехла, образуя скопления полезных компонентов. Древнейшими из разломов являются доуралиды с северо-западным и субширотным простиранием. Разломы служат критериями при поисках нефти, газа, руд и пр. По ним перемещаются глубинные флюиды и развивается техногенез, ускоряя изменение климата, что угрожает биосфере. Для перехода к ноосфере нужна программа выживания человечества.

**Ключевые слова:** гидрогеодинамика, прорывные технологии, «сверхвода», ноосфера, флюидные системы, постулат В.И. Вернадского.

Abstract. Until now the ideas about hydrogeodynamics of regions and the planet are poorly connected, preventing the development of breakthrough technologies The discovery of "superwater" confirmed V.I. Vernadsky's idea that "water has a special position and stands apart in the history of our planet" S.L. Shvartsev called this postulate of V.I. Vernadsky. that we should support and recommend the RAS to establish the Institute of Hydrosphere named after S.L. Shvartsev. S.L. Shvartsev with technoparks and science-intensive, breakthrough technologies. Oil, gas and other minerals are formed in water in a supra-critical state. In our region, 11 stages of restructuring of the structural and hydrogeological plan have been identified and hydrogeological floors and subfloors have been created. The renewal of faults renews the links and repeatedly exchanges the waters of the basement and cover, forming accumulations of useful components. The oldest of the faults are pre-Uralids with northwestern and sublatitudinal strike. The faults are a criterion in the search for oil, gas, ores and other. They transport deep fluids and drive technogenesis, accelerating climate change that threatens the biosphere. The transition to the noosphere requires a program for the survival of Mankind.

**Key words:** hydrogeodynamics, breakthrough technologies, "superwater", noosphere, fluid systems, V.I. Vernadsky's postulate.

### О гидрогеодинамических представлениях

В.И. Вернадский (1931) писал: «Несмотря на то, что природные воды имеют исключительное значение в жизни человека, что они научно изучаются в течение тысячелетий, что для их изучения созданы отдельные научные дисциплины, наши знания о них далеко не отвечают ни их исключительному жизненному значению, ни современному состоянию науки. Это связано в значительной мере с тем, что гидрогеология чрезвычайно сузила свои задачи, свела их практически только к выяснению геологического положения вод, их движения и к явно недостаточному представлению о их химическом составе» [3, с. 648]. В науках о воде и о Земле за 90 лет достигнуты большие успехи. Крупным вкладом стали «Гидрогеология СССР» в 55-ти томах и «Основы гидрогеологии» под редакцией Е.В. Пиннекера в шести томах, а также публикации по гидрогеологии континентов и океанов Земли, по картографированию регионов с оценкой качества и количества вод [9, 11, 18, 19, 21–23, 25]. Но Е.В. Пиннекер и С.Л. Шварцев [22, с.12, 26] и другие исследователи [5–10, 13–17, 20–22, 25] подчеркнули, что воды – это не только важнейший природный ресурс, а «компонент (стихия) окружающего мира», по В.И. Вернадскому.

\_

<sup>1</sup> Ред.: эссе публикуется в авторском варианте и в порядке дискуссии.

Региональное рассмотрение гидрогеодинамики нередко оторвано от глобального, хотя это звенья одной цепи и требуют целостной картины, т.е. требуется осветить картину связей между флюидами, которые обусловливают плюмы в ядре и процессы в гипоцентрах мантии с водами в надкритическом и гравитационном состоянии. Это повысит эффективность прогнозирования и безопасность жизнедеятельности, а гидрогеология и инженерная геология из прикладных наук станут фундаментальными, способными на основе систем мониторинга к прогнозу и управлению ситуацией с предотвращением негативных явлений, уточнением элементов водного баланса, характера распространения компонентов-загрязнителей в зоне активного водообмена и пр.

Воды глубоких горизонтов изучаются при поисках и разведке месторождений нефти и газа и подземном строительстве. Но источники стихийных бедствий остаются почти не изученными. О водах, залегающих у границы Конрада, информируют только белые и черные «курильщики», влияющие на зону активного водообмена. Содержание в них хлора, натрия, стронция, брома и бора почти не отличается от вод в океане. Другие их компоненты свидетельствуют об активности взаимодействия их с мантией. В них больше кремния и алюминия в  $(5-50)\cdot 10^1$  раз, калия и кальция — в 0.4-5 раз, железа и марганца в  $(2-7)\cdot 10^6$  раз, но меньше свинца — в  $(2-6)\cdot 10^4$  раз, меди, цинка и кобальта в  $(4-40)\cdot 10^3$ , бериллия и серебра в  $(1-2)\cdot 10^3$ , кадмия — в 100 раз, лития, рубидия и бария — в 3-40 раз, мышьяка — в 10 раз, редкоземельных элементов — в  $(2-50)\cdot 10^1$ , кроме европия и церия — в  $(6-40)\cdot 10^2$  раз (Предисловие к [4]). Это характеризует систему В.И. Вернадского.

Почти не поддаются прогнозу землетрясения, что актуально. Задачи такого прогноза могут быть решены путем исследований и моделирования всей флюидной системы планеты, включая воды в гравитационном и надкритическом состоянии, и те, с которыми связаны плюмы в ядре и мантии, в том числе в гипоцентрах глубоких землетрясений. Исследования и моделирование системы «вода – порода – газ – живое вещество» выведут нас на прорывные технологии. Такие исследования, к сожалению, пока не многочисленны [2, 8, 37], поскольку в планах РАН их, к сожалению, нет. Открытие так называемой «сверхводы» сделано за рубежом [28–30]. Оно подтвердило мнение Вернадского, что «вода занимает особое положение и стоит особняком в истории нашей планеты» [27, с.20], С.Л. Шварцев назвал эту мысль постулатом В.И. Вернадского. Предлагается включить в резолюцию форума и рекомендовать РАН создать Институт гидросферы им. С.Л. Шварцева совместно с технопарками с наукоемкими прорывными технологиями. С участием воды в надкритическом состоянии у границы Конрада трансформируются и транспортируются углеводороды, металлы, алмазы.

С региональных позиций рассмотрим факторы формировании глубинной гидросферы на примере Урала и Предуралья. Реконструкция длительной истории формирования вод седиментогенных, инфильтрогенных и смешанного происхождения выполнена на основе разработок П.Н Чирвинского, Н.К. Игнатовича, А.М. Овчинникова, А.А. Карцева, С.Б. Вагина, Е.А. Баскова и др. На горно-складчатом Урале инфильтрогенные, пресные воды преобладают до глубин в 600 м, сменяясь термальными солоноватыми водами и рассолами, гидродинамически активными [1, 10]

На разных по продолжительности этапах развития сформировались структуры и изменялось их строение с водоносными комплексами, гидрогеологическими этажами, водоупорами, вулканогенными супербассейнами. При структурно-гидрогеологической перестройке субаквальные артезианские бассейны сменялись на субаэральные или переходные. Пока выделено 11 этапов перестройки: от протерозойского и кембрийского до мезозойского и кайнозойского (рис. 1) [9]. Преобладают переходные бассейны с полными или неполными инверсиями. Полные включают кембрийский с конца протерозоя, нижне-каменноугольный и мезозойско-кайнозойский этапы, а неполные завершились в конце эйфельско-кыновского, московско-кунгурского и визейско-башкирского этапов. В бассейнах всех этапов сформировались комплексы осадков, а при инверсиях произошла структурно-гидрогеологическая перестройка с образованием региональных водоупоров, четырех

гидрогеологических этажей и трех подэтажей. Картина конкретизируется по мере изучения объединенных пока в общие подэтажи рифейско-вендских и эйфельско-кыновских, а также франско-турнейских и визейско-башкирских образований. С ростом мощности толщ и числа водоупоров закрытость трещинных вод фундамента возрастала.

ЭТАПЫ		Α	Б	В	Γ	
Mz-Kz	П	Πn	П" Па	лг	ПГ°	
	T					
P <sub>2</sub> - T <sub>1</sub>	П	П"Ц"	$\Pi_{\theta} \Im \Gamma_{oc} \Im \Pi_{\theta}$	3 Foc	€ 7 ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° ° °	
	T	11/1/1/11	11/11/14/1	0		
C2m-P1Kg	П	Пв	ЭПе	∃Γ <mark>00</mark> 3Π <sub>8</sub>	3Fac"	
	Т	- (	c . c	1111001111		
C2V2-C2	П	п"п»	П"Пв	LC" LC"	LC"LC"	
	T	11/1/1/1/1/	111111111111	11/1/11/11	()()()(m)	
C1v-C28	П	Пе	Пв	FC, FC	'[Cn[C]	
	Т	~~~~	~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	1119911	(((()))	
C <sub>1</sub> mn-C <sub>1</sub> s	П	П"	п"	ГСП	LC LC"	
	T	1,1,1,1,1,1,1	1,1,1,1,1	1,1,1,1,1	77770	
Dafe Cit	П	Пв	11 <sub>R</sub>	LCu	FCn FC"	
	T				<b>(1)</b>	
Dzef Dska	П	Пв	$\Pi_{\epsilon}$	ГС" ГС"Пв	ГС ,  ГС <sup>п</sup>	
	Т	(二) (華)		11/1	v , ∨ ⊕	
0 D,	П	U <sub>u</sub> ,	Пв	ΓC <sub>π</sub> ΓC <sup>π</sup>	ГС <sub>п</sub> ГС "	
	Т	11119111		(E)	<b>*</b>	
€.	П	Π"	Пп	75 P T T T T T T T T T T T T T T T T T T	FCn 9Foc	
	T	1,1,1, <del>411)</del> 1	1,1,1,1,1,1			
Pels Pel Pels Pels	η	Πε Π' Π' CM' ΓCn	ΓCα Πε ΓCα Π <sup>α</sup> α ΓCα CM	ΓC π	rc n	
	Т	//////////////////////////////////////		11		
		1 12	4 V V	5 1 6		
	7///	7 888 8	a II 10	11 C C 12		

Рис. 1. Этапы структурно-гидрогеологической перестройки региона [8]. Современные геологические структуры: А – восточная часть Русской платформы, Б – Предуральский краевой прогиб, В – Уральская постмиогеосинклинальная складчатая подобласть, Г – Уральская постэвгеосинклинальная складчатая подобласть. Артезианские бассейны и массивы: 1 — субаквальные, 2 — субаэральные, 3 — переходные, 4 — адартезианские, 5 вулканогенные супербассейны, 6 – гидрогеологические массивы, 7 – адмассивы, 8 – системы адмассивов и массивов, 9 - преобладание гидрогеологических массивов и подчиненное развитие субаэральных артезианских бассейнов; 10 – субплатформенный (трапповый) магматизм; 11 – кратковременные перерывы в осадконакоплении; 12 – осолонение вод в бассейне. Палеотектоническая обстановка (П): геосинклинальная система, поднимающаяся  $(\Gamma C^n)$  или прогибающаяся  $(\Gamma C_n)$ . Срединные массивы геосинклинальных областей, поднимающиеся (СМ<sup>п</sup>) или прогибающиеся (СМ<sub>п</sub>). Эпигеосинклинальные орогенные системы, поднимающиеся (ЭГос<sup>п</sup>) или прогибающиеся (ЭГос<sub>п</sub>). Области, переходные от орогенных к платформенным, пост- или межорогенные, поднимающиеся ( $\Pi\Gamma^{\Pi}$ ) или прогибающиеся ( $\Pi\Gamma_{\Pi}$ ), платформы с впадинами ( $\Pi_{\rm n}$ ) или поднятиями ( $\Pi^{\rm n}$ ). Эпиплатформенные орогенные области с впадинами ( $\Pi$ <sub>п</sub>) или поднятиями ( $\Pi$ <sup>п</sup>).

Даже при учете многократного обновления за геологическую историю вод кристаллического фундамента и осадочного чехла релаксация их состава за счет реликтов палеообстановки обеспечила гидросфере черты гидрогеохимической стратификации за счет вертикальной зональности. С.И. Смирнов [24] показал, что открытая геологическая система

способна к релаксации, а С.Л. Шварцев [8] доказал, что ее закрытость непрерывно растет за счет глинистых минералов, образующихся при взаимодействии вод с алюмосиликатами. Воды хлоридно-кальциевого типа в девоне и в низах осадочного чехла сформировались при обмене вод осадочного чехла с водами и породами кристаллического фундамента и мантии. Водообмен их был более активным до образования нижнекаменноугольного и кыновского водоупоров. С ростом мощности осадочного чехла и числа региональных водоупоров связи их затухали, приобретая специфические черты. При тектонических движениях и обновлении дизъюнктивных нарушений взаимосвязь вод фундамента и осадочного чехла на участках тектонических разломов то восстанавливалась, то затухала. Знаки движений многократно менялись, трещиноватость пород то росла, то уменьшалась, а подземные воды многократно перемещались по разрезу с физико-химическими и биогеохимическими преобразованиями системы «вода — порода — газ — живое вещество». Формировались компоненты полезных ископаемых. Процессы многократно повторялись с ростом их концентраций и образованием месторождений или их разрушением при рассеянии компонентов.

В регионе фиксируются наиболее древние разломы, доуралиды субширотного и северо-западного простирания. На горно-складчатом Урале преобладают субмеридиональные нарушения. В зонах пересечения уралид с доуралидами выявлены крупные месторождения; на платформе – месторождения нефти и газа, а на Урале – рудные месторождения черных, цветных, благородных и редких металлов.

Тектонические разломы - надежные поисковые критерии МПИ, на платформе месторождений нефти и газа с продуктами окисления углеводородов на стенках трещин, а на Урале – рудных месторождений с гидротермально измененными породами. Разломы обеспечивают взаимосвязь современных структур с глубинными флюидными системами планеты. Гидросфера с этажами I-III и гравитационными водами занимает верхнюю часть флюидной системы (рис. 2). Граница Конрада отделяет гравитационные воды гидросферы от вод надкритическом состоянии. Самыми глубокофокусными землетрясениями фиксируются дизъюнктивные дислокации, где трещины открываются, давление вод падает, и в связи с переходом флюидов из надкритического состояния в гравитационное объем вод увеличивается как минимум в 1.5 раза. От их количества зависит сила и последствия взрыва. Глубже этих гипоцентров объемы вод в надкритическом состоянии уменьшаются, и при их дизъюнктивные трансформации взрывы сменяются плюмами, a деформации пликативными, которые распространяются в мантии и в земной коре.

# Выводы

Дизъюнктивные дислокации, видимо, играют ведущую роль при формировании структурно-гидрогеологического плана территории. Так, в нашем регионе наряду с Уральскими горно-складчатыми сооружениями развивались аналогичные структуры Казанско-Кажимского прогиба, у которого дизъюнктивные деформации недоразвитыми. Но осложнилось тектоническое строение восточной части Русской сформировались меридионально ориентированные платформы: сводовые фундамента, Предуральский краевой прогиб и постмиогеосинклинальная складчатая зона Урала в районе Медногорска, и на широте Екатеринбурга локально проявились дизьюнктивные нарушения с магматическими породами. Региональное развитие они получили в постэвгеосинклинальной зоне Урала, восточнее. В результате сформировались разнообразные бассейны и гидрогеологические массивы. На горно-складчатом Урале преобладают гидрогеологические массивы и адмассивы с подчиненным развитием субаэральных артезианских бассейнов и большим количеством кратковременных перерывов в осадконакоплении. На платформе имеет место субплатформенный (трапповый) магматизм и осолонение вод в бассейне.

Палеотектонические пликативные деформации геосинклинали выражены в виде поднятий ( $\Gamma C^{\Pi}$ ) или прогибов ( $\Gamma C_{\Pi}$ ), срединных массивов ( $\Gamma C_{\Pi}$ ) и эпигеосинклинальных орогенных систем ( $\Gamma C_{\Pi}$ ). То же самое произошло в областях, переходных от орогенных к платформенным, пост- или межорогенных ( $\Gamma \Gamma^{\Pi}$  и

 $\Pi\Gamma_\Pi$ ), на платформе с впадинами ( $\Pi_\Pi$ ) или поднятиями ( $\Pi^\Pi$ ), а также в эпиплатформенных орогенных областях с впадинами ( $\Pi^\Pi$ ) или поднятиями ( $\Pi^\Pi$ ). Техногенные факторы усиливают негативные изменения климата, угрожая существованию биосферы и Человечества. По В.И. Вернадскому, нет альтернативы перехода к ноосфере, или сфере разума, и такие преобразования должны осуществляться в масштабах всей планеты на основе научно разработанной программы выживания. Она должна включать науку о гидрогеодинамике планеты и ее флюидных систем.

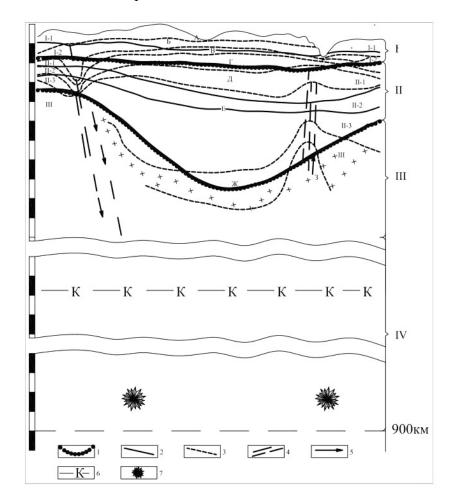


Рис. 2. Вертикальная зональность гидросферы Предуралья (составили И.В. Куделина и А.Я. Гаев). Гидродинамические этажи: I – активного водообмена и регионального стока; II – затрудненного водообмена в низах осадочного чехла; III – трещинных, гравитационных вод до границы Конрада (6); IV – вод мантии до глубинных гипоцентров землетрясений (7) 700–900 км. Комплексы со стоком из пород: MZ-KZ: I-1; P2-3 – I – 2; московско-кунгурских – II-1; франско-верейских (II-2) и протерозойско-кыновских (II-3). Зоны: гидрогенеза: карбонатного (A), сульфатного (A), сульфатного (A), равновесного (A) и унаследованного (A); гидрометагенеза (A) в A1 и A2 утажах).

Работа выполнена в рамках темы № 0404-2019-0019 в соответствии с планом НИР ИЭ УрО РАН.

- 1. Басков Е.А., С.Н. Суриков. Гидротермы Земли. Л.: Недра, 1989. 245 с.
- 2. Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы. СПб.: Изд-во СПб ГУ, 2008. 420 с.
- 3. Вернадский В.И. История природных вод. М.: Наука, 2003. 751 с.
- 4. Вернадский В.И. История природных вод. С пояснениями ред. В.М. Шестопалова. Киев: Ин-т геол. наук НАН Украины. 2012. Кн. 1. 754 с. Кн. 2. 350 с.
  - 5. Гавриленко Е.С., Дерпгольц В.Ф. Глубинная гидросфера Земли. Киев: Наукова думка, 1971. 272 с.

- 6. Гаев А.Я. Гидрогеохимия Урала и вопросы охраны подземных вод. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1989. 368 с.
- 7. Гаев А.Я., Килин Ю.А., Савилова Е.Б., Маликова О.Н. Фундаментальные и прикладные проблемы гидросферы. Ч. 1. Основы гидрогеологии: Учеб. пос. М.: Университетская книга, 2016. 160 с.
- 8. Алексеев В.А., Букаты М.Б., Зверев В.П., Мироненко М.В., Рыженко Б.Н., Чарыкова М.В., Чудаев О.В., Шварцев С.Л. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода. Новосибирск. 2005. Т. 1. 244 с.
  - 9. Гидрогеология СССР. М.: Недра, 1970–1978.
- 10. Григорьев С.М. Роль воды в образовании земной коры. Дренажная оболочка земной коры. М.: Недра, 1971. 263 с.
- 11. Джамалов Р.Г., Зекцер И.С., Месхетели А.В. Подземный сток в моря и Мировой океан. М.: Наука, 1977. 93 с.
- 12. Каменский Г.Н., Толстихина М.М., Толстихин Н.И. Гидрогеология СССР. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 366 с.
  - 13. Карцев А.А., Вагин С.Б., Басков Е.А. Палеогидрогеология. М.: Недра, 1969. 151 с.
- 14. Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф. Гидрогеология вулканогенов. СПб.: Наука, 2010. 395 с.
  - 15. Кирюхин В.А. Общая гидрогеология: Учебник. СПб., 2008. 440 с.
- 16. Кирюхин В.А., Швец В.М. Гидрогеология XXI века возможные пути развития // Изв. вузов. Геология и разведка. 2007. № 1. С. 56–63.
- 17. Корценштейн В.Н. Растворенные газы подземной гидросферы Земли / В.Н. Корценштейн. М.: Недра, 1984. 230 с.
- 18. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод / Б.И. Куделин. М.: Изд-во МГУ, 1960. 344 с.
  - 19. Максимович Г.А. Химическая география вод суши. М.: Географгиз, 1955. 328с.
- 20. Очерки дегазации Земли. Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С. Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических полигонных исследований НАН Украины, Институт геологических наук НАН Украины, 2018. 632 с.
  - 21. Павлов А.Н. Геологический круговорот воды на Земле. Л.: Недра, 1977. 143 с.
- 22. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Шварцев С.Л. Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1980. 231 с.
- 23. Подземные воды мира: ресурсы, использование, прогнозы / Под ред. И.С. Зекцера. М.: Наука, 2007. 438 с.
- 24. Смирнов С.И. О природе гидрогеохимической зональности // Бюл. Моск. о- ва испытателей природы Отд. геол. 1981. Т. 56, вып. 1. С. 124–138.
- 25. Судариков С.М. О районировании подвижных гидрогеологических областей океана (на примере Срединно-Атлантического хребта) // Гидрогеология и карстоведение. Пермь: Изд-во Пермского ун-та, 2013. № 19. С. 30–37.
- 26. Поровые растворы горных пород как среда обитания микроорганизмов / П.А. Удодов и др. Новосибирск: Наука, 1981. 176 с.
- 27. Шварцев С.Л. Будущее гидрогеологии в резком расширении границ ее исследований // Гидрогеология и карстоведение. Пермь, 2009. Вып. 18. С. 12–21.
- 28. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013; DOI:10.1073/pnas.1220301110. Источник chemport.ru.
  - 29. Сайт в Интернете ecology.iem.ac.ru.
  - 30. Сайт NASA: на Солнце существует вода. Ссылка http://earth- chronicles.ru/news/2014-11-19-73514.

\_

# ГИДРОГЕОХИМИЯ НОВОБИБЕЕВСКОГО ПРОЯВЛЕНИЯ РАДОНОВЫХ ВОД

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-400-404

Дульцев Ф.Ф., Новиков Д.А., Максимова А.А., Деркачев А.С., Черных А.В. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе представлены первые данные по особенностям гидрогеохимии Новобибеевского проявления радоновых вод. Изучаемые воды распространены в границах села и подвержены антропогенному влиянию. По составу они преимущественно HCO<sub>3</sub> Mg-Ca с величиной общей минерализации 496–877 мг/дм<sup>3</sup>. Характеризуются большими вариациями параметров геохимической среды (pH 6.6–7.5, Eh –81.2...+212.7 мВ;  $O_{2\text{раств.}}$  1.6–7.9 мг/дм<sup>3</sup>) и содержанием кремния 5.8–13.3 мг/дм<sup>3</sup>. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм<sup>3</sup>):  $^{238}$ U от 5.25·10<sup>-4</sup> до 0.13 и  $^{232}$ Th от 1.86·10<sup>-7</sup> до 2.43·10<sup>-5</sup>.  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в радоновых водах варьируется в интервале от 2.63·10<sup>-5</sup> до 2.92·10<sup>-2</sup>, при среднем 4.24·10<sup>-3</sup>. Активность  $^{222}$ Rn в скважинах варьируется от 4.0 до 167.5 Бк/дм<sup>3</sup>.

**Ключевые слова**: радионуклиды, гранитный массив, проявление радоновых вод, село Новобибеево, Сибирь.

**Abstract** The first data on the hydrogeochemical features of the Novobibeevo radon water occurrence are presented in the work. Waters under study are located at the territory of the settlement and are prone to anthropogenic impact. Water composition is mainly HCO<sub>3</sub> Mg-Ca with TDS 496–877 mg/dm<sup>3</sup>. The waters are characterized by large variations of the parameters of geochemical medium (pH 6.6–75, Eh –81.2 – +212.7 mV; O<sub>2dissolved</sub> 1.6–7.9 mg/dm<sup>3</sup>) and silicon content 5.8–13.3 mg/dm<sup>3</sup>. Radionuclide content is (mg/dm<sup>3</sup>): <sup>238</sup>U from 5.25·10<sup>-4</sup> to 0.13 and <sup>232</sup>Th from 1.86·10<sup>-7</sup> to 2.43·10<sup>-5</sup>. The <sup>232</sup>Th/<sup>238</sup>U ratio in radon-rich waters varies from 2.63·10<sup>-5</sup> to 2.92·10<sup>-2</sup>, with the average value 4.24·10<sup>-3</sup>. The activity of <sup>222</sup>Rn in wells varies from 4.0 to 167.5 Bq/dm<sup>3</sup>.

Key words: radionuclides, granite massif, radon water occurence, Novobibeyevo, Siberia.

В окрестностях Новосибирской городской агломерации (НГА) широко распространены проявления радоновых вод. Распределение  $^{222}$ Rn обусловлено наличием рассеянных радиоактивных минералов в гранитоидных массивах, расположенных на изучаемой территории. В 1980–1990 г. было открыто более десяти месторождений радоновых вод (Заельцовское, Южно-Колыванское, Тулинское и др.). Как показали результаты геологоразведочных работ, содержание радона в подземных водах НГА варьируется от 0/1 до 43764/6 Бк/дм $^3$ . Выявленные месторождения к настоящему времени практически не описаны в научной литературе [1–5]. Последние сведения приводятся в работах [6–11].

Во время полевых работ 2019 г. в скважинах нецентрализованного водоснабжения Новобибеевского сельского поселения были выявлены повышенные концентрации радона до 167/5 Бк/дм<sup>3</sup>, которые были подтверждены материалами 2020 г. Было изучено 17 проб из скважин, расположенных непосредственно в селе, пять проб из объектов разрабатываемого карьера бутового камня «Новобибеевский» и две пробы из р. Ояш (рис. 1, а). Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Название химического типа воды дано в соответствии с формулой М.Г. Курлова (от 10 %-экв) по оттеночному принципу от меньшего к большему.

В гидрогеологическом разрезе Новобибеевского проявления радоновых вод геологоразведочными работами выделены безнапорные воды палеозойского фундамента, представленного гранитоидами Обского массива, в состав которых входят серые и розоватосерые порфировидные граниты верхнепалеозойского возраста, реже гранодиориты и прорывающие их дайки долеритов. Интрузивные породы разбиты сетью трещин, образующих единую обводненную зону трещинных вод. Водообильность данного проявления крайне невысока: при пробных откачках максимальное понижение уровня в скважинах достигалось практически сразу, а его полное восстановление проходило в течение двух суток. Вскрытая мощность обводненных гранитоидов составила 120 м. Они перекрываются водоносным горизонтом рыхлых осадков четвертичного возраста мощностью до 15 м, представленных аллювиальными отложениями р. Ояш, включая

русловые, пойменные, первой и второй надпойменных террас и породы краснодубровской свиты среднечетвертичного возраста.

Кора выветривания гранитоидов на исследуемой территории сохранилась лишь в виде отдельных, небольших по площади участков, что объясняет гидравлическую взаимосвязь между водоносными горизонтами по всей площади их распространения. Питание горизонта атмосферное. Абсолютные отметки зеркала подземных вод уменьшаются от 196/3 до 187/4 м в направлении русла р. Ояш, урез которой находится на уровне 186/94 м.

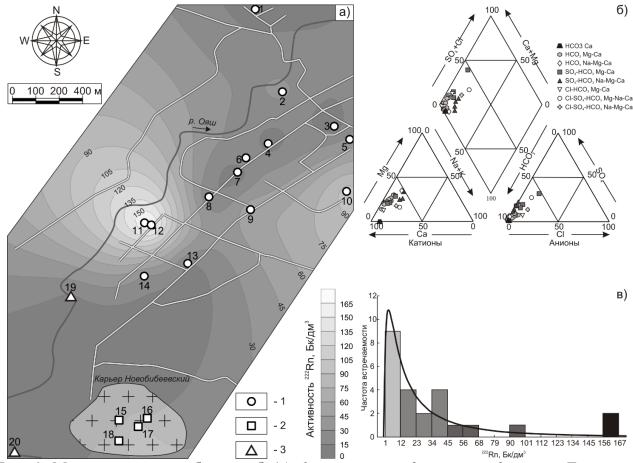


Рис. 1. Местоположения отбора проб (a), I — скважины; 2 — карьер; 3 — река. Диаграмма Пайпера макрокомпонентного состава изученных вод  $(\delta)$ . Распределение радона на изучаемой территории.

Разделение имеющихся гидрогеохимических данных на однородные геохимические совокупности было выполнено с помощью коэффициентов (Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, Ca/Na, Ca/Mg, rNa/rCl и SO4/Cl). Коэффициенты Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si использованы для оценки особенностей обогащения вод за счет процессов гидролиза алюмосиликатов и конгруэнтного растворения карбонатов;  $SO_4^{2-}/Cl^->>1$  и  $rNa^+/rCl^->>1$  — гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; пропорциональное увеличение значений  $SO_4^{2-}/Cl^-=1$ ,  $rNa^+/rCl^-\ge 1$ , Ca/Na>0 — испарительного концентрирования. Можно выделить четыре геохимических группы: трещинно-жильные воды гранитоидов (группа I), воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния (группа II), поверхностные воды в условиях техногенной нарушенности (группа III) и поверхностные воды р. Ояш (группа IV).

Первые (I) изучены в скважинах на ул. Молодежная: водозаборной (централизованного водоснабжения поселка) и колонкой на ул. Школьная. Они характеризуются  $HCO_3$  Mg–Ca составом с величиной общей минерализации от 496 до 553 Mr/ $ZM^3$  и содержанием кремния от 7.2 до 13.3 Mr/ $ZM^3$ . Геохимические параметры среды отвечают восстановительной обстановке с величинами pH от 7.3 до 7.5; Eh от -81.2 до -28.0

мВ и  $O_{2$ раств. от 1.6 до 7.7 мг/дм³. Средние значения геохимических коэффициентов для данной группы составляют: Ca/Si 9.56; Mg/Si 2.30; Na/Si 1.31; Si/Na 0.83; Ca/Na 7.56; Ca/Mg 4.42; rNa/rCl 10.51 и SO<sub>4</sub>/Cl 4.39, что может указывать на накопление в водах кальция, магния и протекание процессов окисления сульфидов. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм³):  $^{238}$ U от  $5.25\cdot10^{-4}$  до  $1.80\cdot10^{-3}$  и  $^{232}$ Th от  $4.04\cdot10^{-}$  до  $1.54\cdot10^{-5}$ .  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в водах варьирует в интервале от  $2.25\cdot10^{-4}$  до  $2.92\cdot10^{-2}$ , при среднем  $9.16\cdot10^{-3}$ . Активность радона в водах варьируется в широких пределах от 6.5 до 97.0 Бк/дм³. Невысокие концентрации  $^{222}$ Rn в водозаборной скважине (рис. 1, № 2) связаны с высокой трещиноватостью выветрелых гранитов.

Вторая группа (II) наиболее многочисленная и характеризуется в основном HCO<sub>3</sub> Mg-Са составом с величиной общей минерализации от 511 до 877 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния от 5.8 до 9.7 мг/дм<sup>3</sup>. Геохимические условия среды изменяются от восстановительных до окислительных (Eh -46.8 - +212.7 мB), pH от 6.6 до 7.5 и  $O_{2pactb}$ , от 1.8 до 6.6 мг/дм<sup>3</sup>. Средние значения геохимических коэффициентов по отношению к первой группе возрастают: Ca/Si 16.25; Ca/Na 13.22; Ca/Mg 6.68, снижаются: rNa/rCl 1.07 и SO<sub>4</sub>/Cl 1.74, сопоставимые величины отмечаются у Mg/Si 2.54; Na/Si 1.37; Si/Na 0.82, предположительно, во второй группе преобладающее влияние на формирование состава вод оказывают породы с существенной ролью кальциевых алюмосиликатов. Широко проявлены процессы антропогенного загрязнения, что отмечается в росте концентраций (мг/дм<sup>3</sup>): SO<sub>4</sub> до 157; Cl до 66.8; NO<sub>3</sub> до 259; Na до 37.6; Br до 0.08; Sr до 1.49 и др. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм<sup>3</sup>):  $^{238}$ U от  $1.05 \cdot 10^{-3}$  до  $3.97 \cdot 10^{-2}$  и  $^{232}$ Th от  $1.86 \cdot 10^{-7}$  до  $2.43 \cdot 10^{-5}$ .  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в радоновых водах варьируется в интервале от  $9.91 \cdot 10^{-5}$  до  $1.89 \cdot 10^{-3}$ , при среднем  $8.46 \cdot 10^{-4}$ . Активность радона в водах варьируется в широких пределах от 4.0 до  $38.0 \, \text{Бк/дм}^3$ .

Третья геохимическая разновидность (группа III) характеризуется  $SO_4$ -HCO<sub>3</sub> Na-Mg-Ca составом с величиной общей минерализации от 385 до 466 мг/дм³ и содержанием кремния от 5.0 до 9.6 мг/дм³ (рис. 1, б). Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с величинами pH от 7.8 до 8.6; Eh от +107.8 до +145.6 мВ и  $O_{2\text{раств.}}$  от 6.5 до 14.4 мг/дм³. Средние значения геохимических коэффициентов для данной группы составляют: Ca/Si 9.55; Mg/Si 3.07; Na/Si 2.97; Si/Na 0.39; Ca/Na 3.51; Ca/Mg 3.33; rNa/rCl 9.46 и  $SO_4$ /Cl 11.49, что говорит о накоплении в них магния, кальция и натрия. Также отмечаются признаки загрязнения, связанные с эксплуатацией карьера. Выявлены высокие значения (мг/дм³): NO<sub>2</sub> до 1.0; NO<sub>3</sub> до 51.7; Na до 20.4; NH<sub>4</sub> до 0.82. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм³):  $^{238}$ U от  $1.02 \cdot 10^{-2}$  до  $1.16 \cdot 10^{-2}$  и  $^{232}$ Th от  $2.60 \cdot 10^{-6}$  до  $3.10 \cdot 10^{-5}$ .  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в радоновых водах варьируется в интервале от  $2.43 \cdot 10^{-4}$  до  $2.69 \cdot 10^{-3}$ , при среднем  $1.83 \cdot 10^{-3}$ . Активность радона в водах варьируется в пределах от 2 до 39 5к/дм³, но не превышает нормы  $\Pi$ ДК (рис. 1, в).

Поверхностные воды р. Ояш (группа IV) характеризуются в основном HCO<sub>3</sub> Ca составом с величиной общей минерализации от 418 до 466 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния от 1.22 до 1.24 мг/дм<sup>3</sup>. Геохимические параметры среды отвечают окислительной обстановке с величинами рН от 8.4 до 8.5; Eh от +148.3 до +150.0 мВ и  $O_{2pactb.}$  от 8.7 до 9.5 мг/дм<sup>3</sup>. Средние значения геохимических коэффициентов составляют: Ca/Si 65.99; Mg/Si 10.73; Na/Si 12.97; Si/Na 0.08; Ca/Na 5.77; Ca/Mg 39.72; rNa/rCl 7.96 и SO<sub>4</sub>/Cl 3.35, что говорит о накоплении в них магния, кальция и натрия. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм<sup>3</sup>):  $^{238}$ U от 2.27·10<sup>-3</sup> до 2.77·10<sup>-3</sup> и  $^{232}$ Th от 6.92·10<sup>-7</sup> до 1.75·10<sup>-5</sup>.  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в радоновых водах изменяется в интервале от 2.50·10<sup>-4</sup> до 7.7·10<sup>-3</sup>, при среднем 3.99·10<sup>-3</sup>. Активность радона в водах варьируется от 1 до 12 Бк/дм<sup>3</sup>.

Анализ имеющихся данных выявил особенности вертикальной гидрогеохимической зональности и состава фоновых трещинно-жильных вод гранитоидов, изученных в скважине на ул. Молодежная (рис. 1, a, N 10). Как показали результаты изучения быстроизменяющихся параметров, мощность зоны активной циркуляции подземных вод составляет около 20 м, глубже превалирует затрудненный водообмен с восстановительными условиями геохимической обстановки (Eh ot -81.2 до -28.0 мB;  $O_{2pactb, ot}$  1.83 до 4.14 мг/дм<sup>3</sup>).

Наблюдается инверсия гидрогеохимического разреза и снижение величины общей минерализации от 511-877 мг/дм³ на глубинах 7.5-20 м до 496-540 мг/дм³ на глубинах 56-70 м. Это сопровождается снижением концентраций SO<sub>4</sub>, Cl, NO<sub>3</sub>, Ca, Na, Br, Li, B, Al, V, Cr, As, Se, Sr, I и закономерным ростом F, Sc, Mn, Ga, Rb, Zr, Ba. Высокие содержания последних связаны с водовмещающими гранитами, поскольку в них присутствуют минералы-концентраторы: флюорит (F, Sc), биотит (Mn, Rb, Ba, Ga), апатит (Sc), циркон (Zr) и сфен (Mn, Zr, F).

На спектре распределения химических элементов отмечаются пиковые значения  $(мг/дм^3)$  у: Si 13.30; Fe 0.75; Sr 1.49; I 0.066; Ba 0.18 и U 0.12 (рис. 2, a). С ростом величины общей минерализации возрастают содержания V, Cr, Br, Sr и Rh, снижаются B, Rb и Y. Для оценки степени накопления в водах Новобибеевского проявления химических элементов были рассчитаны коэффициенты концентрации, которые отражают отношение содержаний элементов в воде к кларку верхней части континентальной коры [12] и коэффициенты водной миграции (по А.И. Перельману) [13].

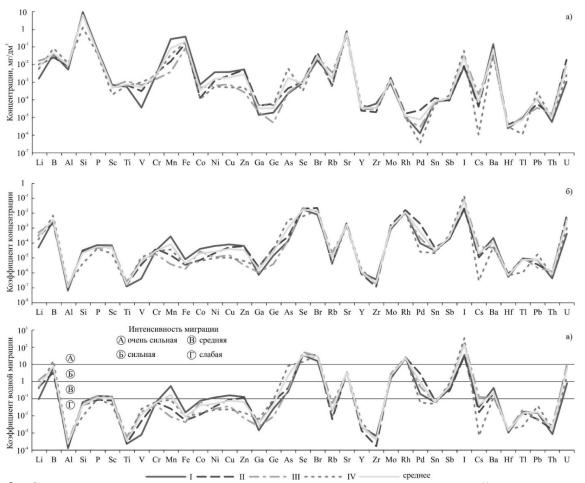


Рис. 2. Спектры распределения микрокомпонентов в водах изучаемой территории (a), коэффициентов концентрации (6) и ряды миграции микрокомпонентов в водах (6).

Согласно рассчитанным коэффициентам концентрации установлено, что в водах в большей мере накапливаются I (0.151), Se (0.022), Br (0.018) и Rh (0.015) (рис. 2,  $\delta$ ). Полученные данные хорошо соотносятся с рассчитанными коэффициентами водной миграции (рис. 2,  $\epsilon$ ), так, B, Se, Br, Rh и I обладают очень сильной миграционной способностью, Li, As, Sr, Mo, Pd и U сильной, P, Sc, Mn, Cu, Zn, Sb, Cs и Ва средней, а Al, Si, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Ga, Ge, Rb, Y, Zr, Sn, Hf, Tl, Pb и Th слабой (инертной).

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы:

Воды изучаемой территории характеризуются преимущественно HCO<sub>3</sub> Mg-Ca составом с величиной общей минерализации от 496 до 877 мг/дм<sup>3</sup> и содержанием кремния от

5.8 до 13.3 мг/дм³. Геохимические параметры среды изменяются от восстановительных до окислительных (Eh от -81.2 до +212.7 мВ);  $O_{2\text{раств, от}}$  1.6 до 7.9 мг/дм³. По геохимическим коэффициентам (Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, Ca/Na, Ca/Ng, rNa/rCl и SO<sub>4</sub>/Cl) выделены четыре разновидности: трещино-жильные воды гранитоидов, воды зоны региональной трещиноватости гранитоидов в условиях антропогенного влияния, поверхностные воды в условиях техногенной нарушенности и поверхностные воды р. Ояш. Содержания радионуклидов варьируются в широких пределах (мг/дм³):  $^{238}$ U от  $^{238}$ U от  $^{232}$ Th от  $^{232}$ Th  $^{238}$ U отношение в радоновых водах варьируется в интервале от  $^{222}$ Rn в скважинах варьируется от

На спектре распределения химических элементов отмечаются пиковые значения у Si, Fe, Sr, I, Ba и U. С ростом величины общей минерализации возрастают содержания V, Cr, Br, Sr и Rh, снижаются B, Rb и Y. По рассчитанным коэффициентам концентрации установлено, что в водах в большей мере накапливаются I, Se, Br и Rh. Коэффициенты водной миграции показали, что B, Se, Br, Rh и I обладают очень сильной миграционной способностью, Li, As, Sr, Mo, Pd и U сильной, P, Sc, Mn, Cu, Zn, Sb, Cs и Ba средней, a Al, Si, Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Ga, Ge, Rb, Y, Zr, Sn, Hf, Tl, Pb и Th слабой (инертной).

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и правительства Новосибирской области в рамках научных проектов № 19-45-540004 и 20-45-543004.

- 1. Посохов Е.В., Толстихин Н.И. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). Л.: Недра, 1977. 240 с.
- 2. Вериго Е.К., Быкова В.В., Гусев В.К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири, 1979, вып. 14. С. 47–51.
- 3. Гусев В.К., Вериго Е.К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека, 1984. С. 99–107.
- 4. Вараксин Ю.Н., Свиридов В.Г., Росляков Н.А., Афанасьев А.Т., Вавилихин Г.А., Васильев И.П., Виниченко В.И., Леонов А.Н., Марус А.И., Михантьева Л.С., Нестеренко Г.В., Самсонов Г.Л., Сердюк З.Я. Геологическое строение и полезные ископаемые Западной Сибири. Т. II. Полезные ископаемые. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1998. 254 с.
- 5. Росляков Н.А., Жмодик С.М., Пахомов В.Г. Естественные радионуклиды в геологической среде Новосибирской области // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV Международной конференции. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. С. 461–464.
- 6. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 4. С. 1255–1274.
- 7. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1451, article 012007.
- 8. Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in Radon Waters of The Zaelsovsky field (The Southern Part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2019. V. 1172, № 1, article 012096.
- 9. Корнеева Т.В., Новиков Д.А. Формы миграции химических элементов в радоновых водах месторождения "Горводолечебница" (г. Новосибирск) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2020. № 17. С. 287–291.
- 10. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Сухорукова А.Ф., Максимова А.А., Черных А.В., Деркачев А.С. Радионуклиды в природных водах Новосибирской городской агломерации // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием (г. Улан-Удэ, 17–20 августа 2020 г.). 2020. С. 134–138.
- 11. Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф. Геохимия системы вода порода проявления слаборадоновых вод "Инские источники" (юг Западной Сибири) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы четвертой Всероссийской научной конференции с международным участием (г. Улан-Удэ, 17–20 августа 2020 г.). 2020. С. 88–92.
- 12. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 383 с.
  - 13. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.

# ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ДЛЯ РЕШЕНИЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-405-409

Дутова Е.М.  $^{1,2}$ , Кузеванов К.И.  $^{1}$ , Никитенков А.Н.  $^{1}$ , Покровский В.Д.  $^{1}$  Томский политехнический университет, Томск, dutova@tpu.ru  $^{2}$ Томский государственный университет, Томск, dutova@sibmail.ru

**Аннотация.** В работе рассматривается отечественный и международный опыт изучения взаимосвязи поверхностных и подземных вод с особенностями рельефа. Дается характеристика основных исследований, проводимых в настоящее время по данному направлению, реализуемому в рамках научной школы, сформированной в Томском политехническом университете; рассматривается полученный опыт и оцениваются перспективы его дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** рельеф, цифровое моделирование рельефа (ЦМР), морфоструктурно-гидрогеологический анализ, геоинформационные системы.

**Abstract.** The paper considers the domestic and international experience of studying the relationship of surface and underground waters with the features of the terrain. The article describes the main research currently being conducted in this area, implemented within the framework of the scientific school formed at Tomsk Polytechnic University, examines the experience gained and assesses the prospects for its further development.

**Key words:** terrain, digital terrain modeling (DEM), morphostructural-hydrogeological analysis, geoinformation systems.

Одним из разделов геоморфологии как науки, выделенным и оформленным в самостоятельное научное направление, являются геоморфолого-гидрологические исследования, посвященные изучению закономерностей формирования речных сетей. С этих позиций в гидрогеологическом отношении наибольшего интереса заслуживает принципиальная возможность анализа особенностей движения подземных вод в пределах зоны активного водообмена.

Основу для развития данного направления составили работы таких отечественных ученых, как В.В. Докучаев, Н.С. Лелявский, В.М. Лохтин, работавших на стыке геоморфологии и гидрологии, а за границей – американского ученого В. Дэвиса. Этими исследователями были заложены основы развития науки о рельефе как эволюционирующей и развивающейся системе, которая не только напрямую связана и выражает себя в особенностях протекания глобального гидрологического цикла, но и определяет основные закономерности формирования водного стока в пределах суши. Дальнейшее развитие и фундаментальное теоретическое обоснование математических закономерностей в формировании структуры речной сети, наряду с глубоким анализом связи порядков речных долин с соответствующими базисами эрозии, представлено в ряде научных работ, наиболее значимыми из которых можно назвать работы Р.Е. Хортона, А.Н. Стралера, Р.Л. Шреве, В.П. Философова, А.А. Вирского, К.К. Маркова. Результаты обобщения огромных объемов фактического материала, полученных В ходе натурных геоморфологических и гидрологических исследований, необходимых для системного развития отрасли водного хозяйства, нашли в трудах ряда ученых, среди которых можно выделить работы Б.Н. Полноводова, Н.А. Ржаницына. В этих трудах даются результаты детального математического анализа речной сети ряда территорий бывшего СССР, а также впервые, еще до становления синергетики как науки, приводятся численные характеристики, описывающие строение речной сети как самоподобного объекта.

Новый жизненный цикл геоморфолого-гидрологических исследований, затрагивающий выявление закономерностей движения подземных вод, определяющихся рельефом, на основе качественно иных возможностей анализа пространственных данных связан с бурным ростом информационных технологий, пришедшимся на вторую половину XX в. и продолжающимся по сей день.

Можно выделить два основных фактора, способствующих активизации дальнейшего развития рассматриваемого направления науки. Первый из них — это доступность

использования данных дистанционного зондирования высокого и сверхвысокого разрешения. Они позволяют как получать цифровые модели рельефа, так и проводить качественный анализ поверхности водосборных бассейнов путем дешифрирования космических снимков, характеризующих отражательную способность поверхности в достаточно широком диапазоне длин волн, покрывающим не только видимую часть спектра солнечного излучения, но и зоны ультрафиолетового и инфракрасного излучения. Вторым фактором ускорения исследовательских работ является развитие вычислительной техники по пути совершенствования аппаратного и программного обеспечения. Новые аппаратные средства наделяют современного исследователя мощью вычислительных возможностей, которые позволяют с высокой скоростью обрабатывать огромные информационные массивы данных дистанционного зондирования. Современное программное обеспечение успешно реализует не только решение классических задач векторной геометрии и растровых операций, но и ориентируется на продвинутые виды геостатистического и нейросетевого анализа. Так, в рамках стандартного набора операций, на данный момент реализованных в подавляющем большинстве современных геоинформационных систем, представлен блок гидрологических вычислений, состоящий из ряда базовых операций по обработке рельефа. В частности, среди них следует упомянуть: заполнение локальных понижений рельефа, оценку направлений стока, расчет накопленного расхода, выделение линий водоразделов и границ водосборных бассейнов, построение конфигурации речных сетей и классификацию порядков речных долин. Статистические и нейросетевые технологии находят приложение в анализе мультиспектральных космоснимков, в выполнении процедур интерполяции и построения прогностических моделей.

Участниками научной школы, сформировавшейся в Томском политехническом университете, разрабатывается научное направление, связанное с анализом рельефа для многоцелевых гидрологических, широкого круга гидрогеологических гидрогеохимических задач. Методологическая основа инновационного подхода исследованию гидрогеологических условий предложена А.А. Лукиным в рамках авторской разработки морфоструктурно-гидрогеологического анализа. Применение этой прогрессивной методики в контексте ее использования для решения практических гидрогеологических задач нашло отражение в трудах А.А. Лукина, Д.С. Покровского, Ю.В. Макушина, В.Я. Бычкова, М.Б. Букаты, Е.М. Дутовой, К.И. Кузеванова, А.Н. Никитенкова, В.Д. Покровского. В работах этих авторов реализованы оригинальные подходы к анализу естественных закономерностей движения подземных вод, рассматриваются факторы формирования их выявляются особенности динамики природно-антропогенных состава, гидрогеологических процессов. Методы гидрогеологического и морфоструктурного анализа ориентируются на компьютерные технологии сбора и обработки информации, включающие методы математической статистики и картографических построений с привлечением ГИСтехнологий [1-4]. Практика показывает, что для решения многоцелевых гидрологических задач целесообразно использовать разные уровни обобщения, концентрируясь региональных и локальных особенностях гидрогеологических условий.

Одним из примеров сочетания методики морфоструктурно-гидрогеологического анализа и современных геоинформационных технологий на региональном уровне является работа, посвященная анализу закономерностей формирования ресурсов подземных вод Северной части Кузнецкого Алатау [5, 6]. В рамках данной работы применены основные положения морфоструктурно-гидрогеологического анализа, реализованные средствами ArcGIS 9.3, детально определены значения и пространственная изменчивость модулей стока подземных вод и произведена оценка интенсивности водообмена на различных уровнях дренирования. На основе построения базисных поверхностей, а также анализа речной сети и гидрометрических данных установлены функциональные зависимости, описывающие связь подземного стока и определяющих его факторов, а также выявлены и исследованы закономерности и величины разгрузки подземных вод в реки разных порядков. В работе наглядно показано, что подземный сток рек разных порядков отражает иерархической

характер разгрузки подземных вод. В частности, подземные воды самых верхних частей геологического разреза, характеризующегося наиболее высокими фильтрационными свойствами, дренируются реками первых порядков, подземные воды большей мощности, в том числе и более глубоких частей геологического разреза, характеризующиеся относительно низкими фильтрационными свойствами, дренируются реками высоких порядков. С увеличением порядка дрены наблюдается уменьшение величины модуля подземного стока.

В итоге работы получена технология оценки и картирования подземного стока горноскладчатых областей, базирующаяся на использовании взаимосвязей характеристик подземного стока по единичным створам стационарных гидрометрических постов и количественных оценок природных факторов.

Ниже приведен пример использования приемов цифрового моделирования рельефа при прогнозировании опасных геологических процессов на урбанизированных территориях, отражающий локальный уровень исследования гидрогеологических условий [7, 8] (рис. 1).

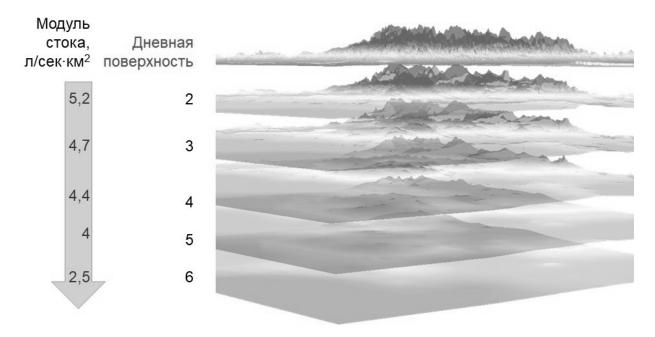
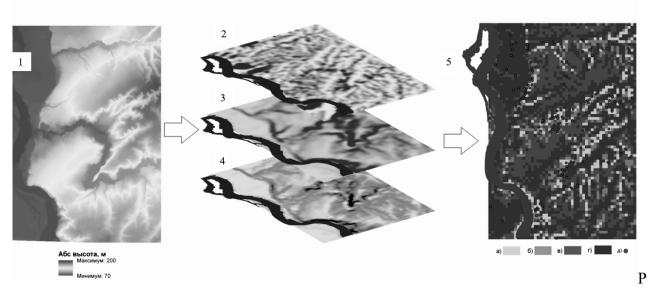


Рис. 1. Соотношение базисных поверхностей и модулей стока рек соответствующих порядков речных долин в пространстве.

Природные и техногенные факторы подтопления, среди которых ведущая роль принадлежит строению верхней части геологического разреза, естественной дренированности территории и характеру ее изменения под воздействием инженерного освоения, интенсивности дополнительного инфильтрационного питания подземных вод, поддаются анализу и функциональному описанию через экспертные количественные оценки. Понятие дренированности как характеристика, отражающая совокупность условий, определяющих скорость и объемы оттока поверхностных и подземных вод с той или иной территории, является одним из ведущих показателей, определяющих необходимость проведения и объемы специализированных дорогостоящих изыскательских работ при изучении процессов подтопления. Вместе с тем, четких методических указаний по непосредственной оценке степени дренированности территорий нет. Для получения ее количественной характеристики, нами предложено использовать набор показателей цифровой модели рельефа (ЦМР), обусловливающих степень дренированности, и определять их величины и значимость в системе балльных экспертных оценок. Нами разработана методика картографических построений и оценки дренированности территорий. Показаны общие операции, выполняемые средствами ГИС над высотными данными, результатом которых являются карты эрозионной сети, плотности и глубины вреза эрозионной сети, уклонов дневной поверхности территории исследований, сопровождаемые их интегральной оценкой как параметра дренированности (рис. 2).



ис. 2. Общая схема оценки дренированности территории города Томска: 1 — цифровая модель рельефа; 2 — карта плотности эрозионной сети; 3 — карта уклонов дневной поверхности; 4 — карта глубины эрозионного вреза; 5 — карта дренированности.

Опыт использования технологий цифрового моделирования рельефа для решения многоцелевых гидрогеологических задач показывает, что прорыв в повышении эффективности и информативности результатов специализированных исследований достигается за счет внедрения возможностей морфоструктурно-гидрогеологического анализа (авторской разработки сотрудников ТПУ), позволяющего использовать данные о строении рельефа дневной поверхности для оценки структуры фильтрационных потоков подземных вод.

Дальнейшее совершенствование анализа гидрогеологических исследований предусматривает адаптацию формальных процедур морфоструктурно-гидрогеологического анализа к современным цифровым технологиям, использующим данные ДДЗ ЦММ ЦМР, позволяющим существенно автоматизировать трудоемкие картопостроительные работы и совмещать результаты гидродинамического районирования с решением прогнозных гидрогеохимических задач в среде физико-химического моделирования на единой электронной картографической основе.

Совершенствование теоретической основы гидрогеологического районирования может быть достигнуто за счет расширения традиционного банка фактического материала по гидрогеологическим скважинам дополнительными оценками многоуровневых гидродинамических схем фильтрационных потоков, базирующихся на авторской методике выявления внутренних связей морфоструктур рельефа с формой поверхностей уровней подземных вод. Такой подход позволяет уточнить положение границ гидрогеологического районирования и повысить достоверность их обоснования.

Современная компьютерная техника открывает новые перспективы для широкого внедрения в методику современных гидрогеологических исследований комплекса теоретических положений, методов и подходов, разработанных сибирскими гидрогеологами томской и иркутской школ в области гидрогеохимии (С.Л. Шварцев, Е.В. Пиннекер, Б.И. Писарский), физико-химического моделирования (И.К. Карпов, М.Б. Букаты), гидрогеодинамики и морфоструктурно-гидрогеологического анализа (Д.С. Покровский, А.А. Лукин). Целью данного проекта является адаптация этих авторских разработок к

современной цифровой платформе для совершенствования количественных оценок при исследованиях природно-техногенных гидрогеохимических систем.

- 1. Лукин А.А. Опыт разработки методики морфоструктурно-гидрогеологического анализа / Отв. ред. С.Л. Шварцев, В.А. Николаев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1987. 110 с.
- 2. Дутова Е.М. и др. Роль морфоструктурного метода при геохимическом районировании и некоторые вопросы применения геохимических поисков на юго-востоке Западной Сибири // Гидрогеохимические методы поисков рудных месторождений / Под ред. В.В. Поликарпочкина, П.А. Удодова. Новосибирск: Наука, 1982. С. 129–136.
- 3. Дутова Е.М. и др. Изучение условий формирования химического состава вод при выделении и обосновании гидрогеохимических / Под ред. В.В. Поликарпочкина, П.А. Удодова. Новосибирск: Наука, 1982. С. 172–177.
- 4. Dutova E.M. Geochemistry of fresh groundwater in the Altai–Sayan folded area and adjacent areas of the West Siberian plate // Applied Geochemistry. 2020. (120).
- 5. Никитенков А.Н., Дутова Е.М. Речной сток и морфометрические параметры водосборов северной части Кузнецкого Алатау // Известия Томского политехнического университета. 2010. № 1 (316). С. 142–147.
- 6. Никитенков А.Н., Дутова Е.М., Покровский Д.С. Картографические построения и оценка морфометрических параметров водосборов горно-складчатых территорий по данным спутниковой съемки (SRTM) (на примере северной части Кузнецкого Алатау) // Вестник Томского государственного архитектурностроительного университета. 2013. № 1. С. 223–231.
- 7. Pokrovsky V. и др. Degree of Areal Drainage Assessment Using Digital Elevation Models // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2014. № 1 (21). P. 012018.
- 8. Pokrovsky V., Pokrovsky D., Dutova E.. Nikitenkov A. The research underflooding processes of architecture monuments on the territory of Tomsk with using GIS-technology // 14th SGEM GeoConference on Science and Technologies In Geology, Exploration and Mining, www.sgem.org, SGEM2014 GeoConference Proceedings, ISBN 978-619-7105-08-7 / ISSN 1314-2704, June 19–25. 2014, Vol. 2. P. 935–942.

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА В ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА ТЕРРИТОРИИ ПЕРМСКОГО КРАЯ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-410-414

#### Казанцева А.С.

Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Пермь, kazanalena@bk.ru

**Аннотация.** В настоящей статье представлен обзор результатов региональных гидрогеологических исследований с применением методов изотопной масс-спектрометрии, проведенных на территории Пермского края. Здесь изотопные исследования для решения гидрогеологических задач только набирают обороты. Однако результаты даже небольшого периода наблюдений позволили сделать выводы о сезонном изменении изотопного состава подземных вод и их генезисе, а также установить влияние климатических параметров и литологического состава пород на распределение изотопных параметров.

**Ключевые слова:** гидрогеологические исследования, методы изотопного анализа, Пермский край, подземные воды.

**Abstract.** This article presents an overview of the results of regional hydrogeological studies using isotope mass spectrometry methods conducted in the Perm region. Here isotope research for solving hydrogeological problems is only gaining momentum. However, even the results of a short period of observations allowed us to draw conclusions about the seasonal change in the isotopic composition of groundwater and their genesis. And to establish the influence of climatic parameters and lithological composition of rocks on the distribution of isotopic parameters.

**Keywords:** hydrogeological studies, methods of isotope analysis, Perm region, groundwater.

Изотопная гидрогеология — быстро прогрессирующее и одно из самых молодых направлений, завоевавшее большую популярность как в России, так и за рубежом в последние 50 лет. Методы изотопной масс-спектрометрии, которые в настоящее время широко используются в мире, что связано с улучшением аппаратурной базы и упрощением методов анализа, позволяют решить обширный круг проблем современной гидрогеохимии. Стабильные изотопы, присутствующие в подземных водах, несут в себе информацию об изменениях, вызванных рядом природных физико-химических процессов в течение времени. Использование стабильных изотопов водорода ( $\delta^2$ H) и кислорода ( $\delta^{18}$ O) завоевало большую популярность при определении областей, источников питания и разгрузки подземных вод, установлении взаимосвязи поверхностных водоемов и водотоков с водоносными горизонтами, оценке взаимосвязи подземных водоносных горизонтов, при исследовании гидрогеохимических эффектов при взаимодействии воды и пород и при решении других задач.

В настоящее время методы изотопного анализа широко внедряются в региональные гидрогеологические исследования. Среди большого количества работ, посвященных применению изотопных методов в гидрогеологии, сравнительно небольшое количество данных имеется для территории Пермского края.

Так, с 1970-х гг. в течение двадцати лет Институт водных ресурсов РАН (г. Москва) проводил исследования изотопного состава атмосферных осадков (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H и <sup>3</sup>H), выпавших на территории Перми. Данные внесены в базу «Глобальная сеть изотопов в осадках» (Global Network of Isotopes in Precipitation, GNIP), созданную в 1961 г. по программе МАГАТЭ по водным ресурсам и Всемирной метеорологической организации, которые изучают стабильные изотопы водорода и кислорода и состав трития в осадках по всему миру [1]. Из многочисленного ряда данных (263 пробы) только 26 проб возможно использовать для интерпретации и анализа изотопного состава атмосферных осадков в г. Перми с использованием стабильных изотопов, 176 – с применением трития.

С 2011 г. анализом изотопного состава воды с помощью метода лазерной инфракрасной спектроскопии на территории Пермского края в лабораторных и полевых условиях занимается лаборатория гидрохимического анализа кафедры динамической геологии и гидрогеологии геологического факультета Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ). Лаборатория оснащена уникальным оборудованием на уровне мировых научных центров [2]. Анализ состава

стабильных изотопов кислорода и водорода ( $\delta^{18}$ O,  $\delta^{2}$ H) проводился на анализаторе L-2130-і (Рісатго, США), результаты обрабатывались статистически и нормализовались относительно стандарта V-SMOW при средней точности измерений  $\delta^{18}$ O ±0.1‰,  $\delta^{2}$ H ±0.4.

В 2011 г. с использованием метода изотопной масс-спектрометрии определены некоторые сезонные изотопные параметры ряда родников на территории городов Соликамска и Березники Пермского края [3]. В то же время произведена попытка интерпретации и ранжирования изотопного состава вод по гидрогеологическим подразделениям. Весной 2012 г. отобраны пробы воды из некоторых родников г. Перми и установлено, что данные изотопного состава подземных вод хорошо согласуются с данными Глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) и воды предположительно имеют метеогенную природу [4].

По результатам исследования изотопного состава воды в 2014 г. на территории Пермского края получены данные по распределению стабильных изотопов кислорода и водорода в снежном покрове, поверхностных и подземных водах [5]. В результате обобщения данных по изотопному составу вод на первом этапе исследований выявлены интервалы распределения содержания дейтерия и кислорода-18 в природных водах и определен их генезис.

В 2014 г. был выполнен изотопный анализ воды подземных озер Кунгурской Ледяной пещеры. Выявлено, что по изотопному составу воды пещерных озер относятся также к метеогенным [6].

С 2016 г. сотрудники Кунгурской лаборатории-стационара Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН при непосредственном участии автора совместно с ПГНИУ (грант РФФИ № 17-45-590369 р\_а «Исследование формирования изотопного и химического состава природных вод на территории Пермского края») занимаются исследованием стабильных изотопов водорода ( $\delta^2$ H) и кислорода ( $\delta^{18}$ O) атмосферных осадков, речных вод, подземных вод и подземных карстовых озер Среднего Предуралья в комплексе с геохимическими исследованиями [7–18].

В период с 2016 г. по 2018 г. выполнен цикл исследований химического и изотопного состава природных вод на территории Пермского края. Изучение особенностей формирования изотопного, а также химического состава подземных вод проводилось в районах сочленения Уфимского вала и центральной части Предуральского прогиба и на территории Колвинской седловины и северной части Соликамской впадины в северной части Предуральского прогиба. Для исследований нами выбраны два района развития карбонатносульфатных пород раннепермского возраста на территории Среднего Предуралья, в которых известны многочисленные выходы подземных вод, пригодных и малопригодных для хозяйственно-бытового, питьевого водоснабжения и для бальнеологии (рис. 1) [19].

В период исследований автором по материалам отечественных и зарубежных ученых [20–24] был обобщен и составлен график распределения изотопного состава разных типов вод. На этот график нанесли данные изотопного состава исследованных вод, полученные в период исследований (2016–2018 гг.; рис. 2). По результатам только изотопного анализа следует, что подземные воды в нижнепермских отложениях Среднего Предуралья пресные или слабоминерализованные инфильтрационного генезиса. Данные комплексного изотопного и химического анализа показывают, что питание подземных вод смешанное, оно происходит за счет атмосферных осадков в основном зимнего и весеннего периодов, напорной разгрузки вод и внедрения вод поверхностного руслового стока.

Одним из важных результатов исследований стал следующий: при смене гидрохимической формации с гидрокарбонатной на сульфатную происходит увеличение минерализации и в то же время утяжеление изотопного состава вод, т. е. наиболее изотопнооблегченные воды с относительно низкой минерализацией (приурочены к соликамской терригенно-карбонатной свите и ассельско-артинскому терригенному комплексу) имеют гидрокарбонатно-кальциевый состав, а наиболее тяжелые с высокой минерализацией (приурочены к водоносной иренской карбонатно-сульфатной серии, частично кунгурской

карбонатно-сульфатной серии и нижнепермской карбонатной серии) — сульфатно-кальциевый.

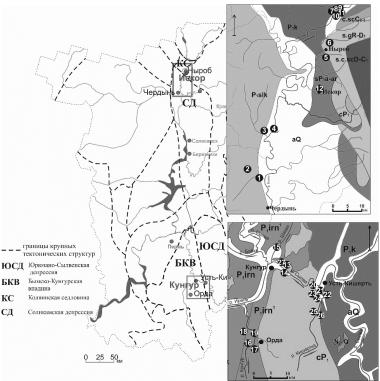


Рис. 1. Районы исследования подземных вод в период с 2016 по 2018 г.

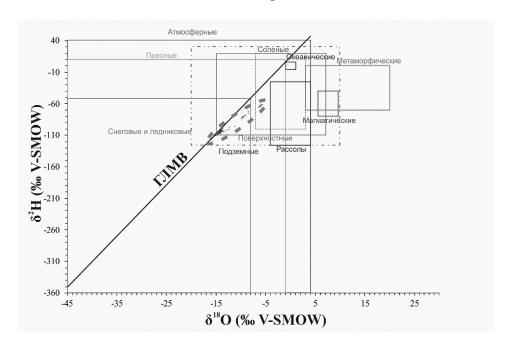


Рис. 2. Распределение типов воды по изотопному составу. Толстой пунктирной линией выделены вариации изотопного состава исследованных вод в нижнепермских отложениях.

Относительно литологического состава водовмещающих пород подземные воды в карбонатно-терригенных отложениях имеют низкую минерализацию и относительно легкий изотопный состав, а в карбонатно-сульфатно-терригенных отложениях воды характеризуются повышенной минерализацией и тяжелым изотопным составом. Полученные сравнительные результаты позволили сделать предварительный вывод о том, что изотопный состав подземных вод зависит от состава вмещающих пород, но практически не зависит от

возраста гидрогеологического подразделения, т. е. возраст пород, в которых сосредоточены подземные воды, никак не влияет на изменение их изотопного состава.

Также установлена широтная зональность изменения химического и изотопного состава подземных вод, обусловленная утяжелением изотопных параметров и увеличением минерализации вод с севера на юг под влиянием изменений климатических условий и литологического состава горных пород.

Таким образом, открытие изотопов, развитие и усовершенствование массспектрометрической техники высокого разрешения оказали огромное влияние на
региональные гидрогеологические исследования. Изотопная гидрогеология — быстро
прогрессирующее и одно из самых молодых направлений. В настоящее время методы
изотопной масс-спектрометрии достигли той стадии развития, когда при решении
обширного круга проблем современной гидрогеохимии спорадические исследования
заменяются систематическими. Изучение закономерностей распределения изотопного и
химического состава вод, а также интерпретация этих данных на основе гидрологических,
гидрогеологических и метеорологических данных являются основой изучения природных
вод. Комплексное применение методов направлено на повышение эффективности решения
задач генезиса подземных вод, вопросов формирования и динамики изменения состава и
качества подземных вод. На региональном уровне подобные исследования позволяют
создать гидрогеологическую основу для расширения сырьевой базы подземных вод и в
целом способствовать социально-экономическому развитию многих муниципальных
образований.

- 1. http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS\_resources\_gnip.html.
- 2. http://www.psu.ru/fakultety/geologicheskij-fakultet/kafedry/kafedra-dinamicheskoj-geologii-i-gidrogeologii/nauchno-issledovatelskaya-deyatelnost-kafedry.
- 3. Белкин П.А., Коротаева Е.Н., Батурин Е.Н. Применение изотопного анализа для уточнения принадлежности источников к водоносным горизонтам и комплексам // Геология в развивающемся мире, Сб. науч. тр. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2012. Т. 2. С. 94–99.
- 4. Наумов Д.Ю. Данные об изотопном составе некоторых родников г. Перми // Геология в развивающемся мире, Сб. науч. тр. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2012. Т. 2. С. 99–102.
- 5. Коротаева Е.Н., Мелехина Е.А. Вариация изотопного состава воды на территории Пермского края // Геология в развивающемся мире, Сб. науч. тр. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т., 2014. Т. 2. С. 174–177.
- 6. Килин Ю.А., Минькевич И.И. и др. Гидрогеологическая обстановка района Кунгурской Ледяной пещеры // Пещеры: Сб. научн. тр.Пермь: Естественнонаучн. Ин-т Перм. гос.. Нац. Иссл. Ун-та., 2014. Вып. 37. С. 148.
- 7. Казанцева А.С. Гидрохимия и изотопный состав реки Колвы // XXII симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова (29–31 октября 2019 г.): Расширенные тезисы докладов. М: Акварель, 2019. С. 205–210.
- 8. Казанцева А.С. Изотопная и геохимическая характеристика вод р. Сылва // Горное эхо. 2020. №1(78). C. 3–7. DOI:10.7242/echo.2020.1.1.
- 9. Казанцева А.С. Изотопный состав атмосферных осадков Северного Урала на территории Пермского края // Инициатива в образовании: проблема интерпретации знания в современной науке: Сборник научных трудов. Казань, 2019. С. 278–280.
- 10. Казанцева А.С. Изотопный состав природных вод Колвинской седловины // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К.И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К. В. Радугина. В 2-х томах. Т. 1. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. С. 421–423.
- 11. Казанцева А.С. Использование методов изотопного анализа в гидрогеологии // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Сб. науч. тр. Вып. 15. Пермь: ГИ УрО РАН, 2017. С. 53–55.
- 12. Казанцева А.С. Исследование изотопного состава атмосферных осадков в г. Кунгуре в 2016–2018 гг. // Горное эхо. 2019. №1(74). С. 7–10.
- 13. Казанцева А.С. История изотопных исследований в гидрогеологии // Вектор ГеоНаук. 2018. Т. 1, № 3. С. 11-22.
- 14. Казанцева А.С. О возможности использования методов изотопного анализа в гидрогеологических исследованиях // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. Пермь, 2020. Вып. 3(40). С. 237–242.

- 15. Казанцева А.С. О формировании химического и изотопного состава подземных вод на границе Ксенофонтовского и Соликамского карстовых районов // Стратегия и процессы освоения георесурсов: Сб. науч. тр. Вып. 16. Пермь: ГИ УрО РАН. 2018. С. 37–40. https://doi.org/10.7242/gdsp.2018.16.10.
- 16. Казанцева А.С. Характеристика подземных вод в нижнепермских отложениях Соликамской впадины // Вестник геонаук. 2020. № 8. С. 18–27. DOI: 10.19110/geov.2020.8.3.
- 17. Казанцева А.С., Кадебская О.И., Дублянский Ю.В., Катаев В.Н. Гидрогеохимическая характеристика подземных вод зоны сочленения Уфимского вала и Предуральского прогиба // Известия УГГУ. 2020. Вып. 2(58). С. 83–96. DOI 10.21440/2307-2091-2020-2-83-96.
- 18. Казанцева А.С., Кадебская О.И., Дублянский Ю.В., Катаев В.Н. Мониторинг изотопного состава атмосферных осадков на территории Пермского края (предварительные результаты) // Метеорология и гидрология, 2019 (2020). №3 С. 87–94.
- 19. Шестов И.Н. Минеральные лечебные воды Пермской области и перспективы курортного строительства: Дис. ... канд. геол-минер. наук. Т. 1. Пермь, 1976. 267 с.
- 20. Киреева Т.А. Нефтегазопромысловая гидрогеохимия и гидрогеодинамика // Нефтегазопромысловая гидрогеохимия. М.: МГУ, 2016. 217 с.
  - 21. Крайнов С.Р., Швец В.М. Гидрохимия: Учебник для вузов. М.: Недра, 1992. 463 с.
  - 22. Котляков В.М., Гордиенко Ф.Г. Изотопная и геохимическая гляциология. Л.: 1982. 288 с.
  - 23. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. Изд-во: Истина, 1999. 366 с.
  - 24. Criss R. E. Principles of stable isotope distribution. New York, 1999. P. 254.

# О ПРОЯВЛЕНИЯХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В СКВАЖИНАХ ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКОГО ПОЛИГОНА, ПОЛУОСТРОВ КАМЧАТКА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-415-418

# Копылова Г.Н.

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Петропавловск-Камчатский, gala@emsd.ru

**Аннотация**. На примере полуострова Камчатка представлены результаты многолетних исследований гидрогеологических предвестников сильных землетрясений и вулканических активизаций. Рассматривается возможность использования полученных результатов при создании научного обеспечения геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае. Приводятся данные о связи появлений гидрогеологических предвестников по сети скважин с параметрами последующих землетрясений и оценками их сейсмического воздействия в районах наблюдений.

**Ключевые слова**: скважина, гидрогеологические предвестники, землетрясение, вулкан, геоинформационная технология.

**Abstract**. The long-term studies of hydrogeological precursors of strong earthquakes and volcanic activations are considered on the example of the Kamchatka Peninsula. The data obtained can be used to create scientific support for a geoinformation technology aimed at forecasting natural disasters in the Kamchatka Krai. Data are given on the relationship between the hydrogeological precursor occurrences along the well network with the parameters of subsequent earthquakes and estimates of their seismic impact in the areas of observation.

Key words: well, hydrogeological precursors, earthquake, volcano, geoinformation technology.

Создание новых технологий основывается на применении научного знания для решения практических задач (https://ru.wikipedia.org/wiki/Технология). Прогнозирование природных катастроф, в т. ч. сильных землетрясений и извержений вулканов, является одной из таких задач, для решения которой проводятся исследования предвестников землетрясений и извержений вулканов. Результаты таких исследований составляют научный базис для создания геоинформационных технологий прогнозирования (ГИТП) в целях их использования административными органами при разработке и проведении превентивных мероприятий на основе заблаговременного определения места, времени, интенсивности и последствий природной катастрофы. Такие ГИТП относятся к социальным технологиям, направленным на повышение качества управленческих решений в кризисных ситуациях, и основываются на данных естественных наук. Главными компонентами ГИТП являются:

- 1) автоматизированные системы наблюдений за параметрами полей Земли, передачи и обработки данных для оперативного выделения предвестников;
- 2) научно обоснованные и апробированные на практике правила применения предвестников для прогнозирования сильных землетрясений и извержений вулканов;
- 3) система принятия решений о прогнозе природного катастрофического события, доведения их до населения и осуществления превентивных мероприятий.

Создание компонентов 1 и 2 относится к области естественно-технических наук, в первую очередь наук о Земле, включая гидрогеологию. Разработка компонента 3 относится к области общественных и гуманитарных наук. Таким образом, создание ГИТП представляет сложную научно-техническую междисциплинарную проблему.

При разработке ГИТП необходимо предусматривать длительный (годы – десятилетия) этап научных мониторинговых наземных и космических исследований геофизических, геохимических, гидрогеологических, деформационных других полей Земли соответствующих видов предвестников. Причина преимущественно эмпирического и длительного по времени способа получения научного знания о предвестниках имеет объективный характер из-за редкости возникновения главных объектов прогнозирования – сильных землетрясений с катастрофическими последствиями и пароксизмальных вулканических извержений. Например, В Камчатском сейсмоактивном регионе

повторяемость опасных землетрясений с величинами магнитуды порядка 7–8 составляет от десятков до первых сотен лет, а периодичность пароксизмальных извержений вулканов Корякский и Авача, расположенных вблизи г. Петропавловска-Камчатского — столицы Камчатского края — составляет не менее первых десятков лет.

Также отметим, что при разработке ГИТП накопление научного знания о предвестниках, их свойствах и особенностях проявления в связи с природными катастрофами в конкретном регионе не может подменяться гипотетическими представлениями о них. Опытно-экспериментальное применение предвестников в практике прогнозирования землетрясений и извержений вулканов в реальном времени является необходимым этапом проверки и верификации предвестников.

В работе рассматривается состояние метода скважинных наблюдений на территории Петропавловск-Камчатского полигона (рис. 1), который реализуется в КФ ФИЦ ЕГС РАН более сорока лет для изучения гидрогеологических предвестников землетрясений [1, 2], и дается его оценка как потенциального элемента ГИТП природных катастроф в Камчатском крае.

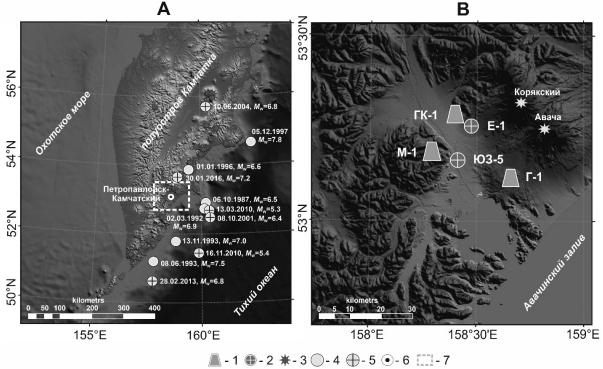


Рис. 1. Схемы расположения эпицентров землетрясений, перед которыми проявлялись гидрогеологические предвестники (ГП) (A), и наблюдательных скважин на территории Петропавловск-Камчатского полигона (B). I — самоизливающаяся скважина; 2 — пьезометрическая скважина; 3 — действующий вулкан; 4 — эпицентры землетрясений, перед которыми ГП были выявлены ретроспективно; 5 — эпицентры землетрясений, перед которыми ГП были выявлены в режиме реального времени; 6 — г. Петропавловск-Камчатский; 7 — Петропавловск-Камчатский полигон на рисунке A.

Уникальной особенностью многолетнего эксперимента по регистрации параметров подземных вод в скважинах Петропавловск-Камчатского полигона является то, что в течение многих лет эти данные использовались для составления еженедельных информационных сообщений о наличии/отсутствии гидрогеологических предвестников землетрясений. По данным наблюдений за вариациями уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 прогностические заключения составляются в лаборатории геофизических исследований под руководством автора с 2002 г. По данным гидрогеохимических наблюдений заключения составляются в лаборатории гидросейсмологии КФ ФИЦ ЕГС РАН. Сейсмопрогностические сообщения передаются в экспертные советы по прогнозу землетрясений, действующие в Камчатском

крае. Одной из функций таких советов, в частности Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС), является оценка поданных прогнозов на предмет их соответствия произошедшим землетрясениям [5].

В работах [1–6] приводятся данные о скважинах, технических средствах измерения параметров подземных вод, описываются методы обработки данных наблюдений, выявленных гидрогеодинамических и гидрогеохимических эффектов перед землетрясениями и активизациями ближайших вулканов, а также примеры успешного использования ГП при прогнозировании землетрясений и извержений вулканов Корякского и Авачи.

Рассмотрим зависимость проявлений ГП в нескольких (n≥2) скважинах от параметров последующих землетрясений — величин и магнитуды  $M_{\rm w}$  и эпицентрального расстояния  $d_{\rm e}$ , с учетом параметров воздействия землетрясений в районе наблюдений (рис. 2).

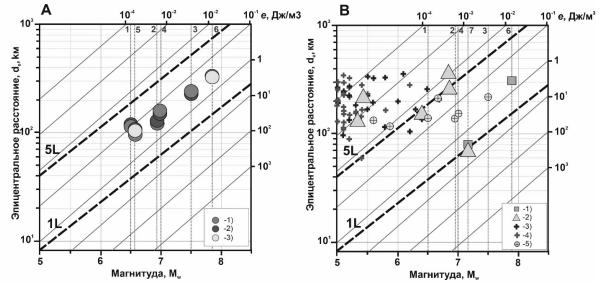


Рис. 2. Распределение ГП в наблюдательных скважинах в зависимости от параметров последующих землетрясений  $M_{\rm w}$  и  $d_{\rm e}$  и удельной плотности сейсмической энергии e: (A) ГП в химическом составе воды в самоизливающихся скважинах: I – ГК-1; 2 – М-1; 3 – Г-1; (B) ГП в изменениях уровня воды в пьезометрических скважинах: I – ЮЗ-5; 2–5 – Е-1: 2 – ГП, выделенные в реальном времени с выдачей заключения о возможном землетрясении для КФ РЭС; 3 – землетрясения с  $M \ge 5.0$ ,  $d_{\rm e} \le 350$  км, которым предшествовали ГП, выделенные ретроспективно; 4 – землетрясения с  $M \ge 5.0$ ,  $d_{\rm e} \le 350$  км, перед которыми ГП не проявлялся; 5 – землетрясения 1987–1996 гг., перед которыми ГП выделен ретроспективно. Тонкие вертикальные пунктирные линии указывают на землетрясения 1–7, которым предшествовали проявления ГП в двух-четырех скважинах. Линии 1L, 5L показывают один и пять максимальных линейных размеров очага землетрясения.

В качестве параметров воздействия ожидаемого землетрясения после проявления ГП использовались расчетная величина удельной плотности сейсмической энергии e, Дж/м³ [6] и интенсивность сотрясений по 12-балльной шкале MSK-64 в районе наблюдений. Всего было семь землетрясений (см. таблицу S2 в [6]), перед которыми ГП проявлялись в двух-четырех скважинах. Все такие землетрясения относились к наиболее сильным сейсмическим событиям с  $M_{\rm w}$ =6.6–7.8 и происходили на эпицентральных расстояниях 90–300 км от скважин. На территории Петропавловск-Камчатского полигона такие землетрясения сопровождались сотрясениями с интенсивностью от 4 до 6 баллов. В районах скважин величина удельной плотности сейсмической энергии при таких землетрясениях составляла от 0.1 до 4.5 Дж/м³. Было также установлено, что ГП проявляются в нескольких скважинах исключительно в ближней и средней (промежуточной) зонах очагов землетрясений, для

которых величина отношения  $d_{\rm e}$  к максимальному линейному размеру очага землетрясения (L) составляет от 1 до 5.

Все рассматриваемые скважины (см. рис. 1, В) вскрывают напорные подземные воды в скальных водовмещающих породах на глубине от первых сотен метров до 2.5 км и являются информативными для обнаружения ГП перед сильными землетрясениями при обеспечении их естественного режима, не нарушенного техногенными воздействиями. Время проявления ГП перед землетрясениями в отдельных скважинах составляло от 1 до 9 месяцев при отсутствии выраженной связи с величиной магнитуды землетрясений (в диапазоне  $M_{\rm w}$ =6.6–7.8).

Некоторые скважины характеризуются повышенной чувствительностью к процессам подготовки землетрясений, и в них ГП проявляются как перед сильными (M≥6.6), так и перед средними по силе землетрясениями с магнитудой 5.0–6.5. К таким объектам относится скв. Е-1, расположенная в 12–25 км от действующих вулканов Корякского и Авачи. В ней ГП проявляются перед землетрясениями магнитудного диапазона  $M \ge 5.0$  на расстояниях до 350 км. При этом вероятность связи проявлений ГП перед землетрясениями увеличивается с ростом величины магнитуды: для событий с M = 5.0–6.5 вероятность такой связи составляет примерно 50 %, для событий с  $M_w$ =6.6–7.8 − 100 % (рис. 2, В). По данным наблюдений в скв. Е-1 были выделены ГП в режиме реального времени с выдачей заблаговременных прогнозов шести землетрясений 2001–2016 гг. с  $M_w$ =5.3–7.2 (рис. 2, В). По заключениям КФ РЭС эти прогнозы были признаны оправдавшимися по времени, местоположению и величине магнитуды ожидаемых сейсмических событий.

За время наблюдений на скв. Е-1 (1987 г. – настоящее время) трижды происходили активизации ближних вулканов, в т.ч. эксплозивно-эффузивное извержение влк. Авача в январе 1991 г., гидротермально-магматическое извержение влк. Корякского в декабре 2008 – 2009 гг. и усиление сейсмичности и фумарольной деятельности влк. Авача в октябре 2019 – марте 2020 г. [3, 4]. В каждом случае перед такими активизациями наблюдалось повышение уровня воды в течение первых лет, показывающее рост давления подземной воды с амплитудами 0.045–0.122 бар вследствие образования тектономагматического источника сжатия водовмещающих пород.

Созданная инфраструктура наблюдений на скважинах и установленная связь проявлений гидрогеологических предвестников с параметрами сильных землетрясений, совместно с результатами использования ГП в практике работы экспертных советов по прогнозу землетрясений, составляют научно-технический базис для включения гидрогеологического метода скважинных наблюдений в разработку геоинформационной технологии прогнозирования природных катастроф в Камчатском крае. Отдельные скважины, расположенные вблизи действующих вулканов, также могут использоваться для мониторинга вулканической активности и прогнозирования извержений.

- 1. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977 2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20.
- 2. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмические вариации уровня воды в скважинах Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2019. 144 с.
- 3. Копылова Г.Н., Болдина С.В., Чубарова Е.Г. Проявление активизаций вулканов Авачинской группы в изменениях уровня воды в скважине Е-1 // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 99–102.
- 4. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Изменения давления подземных вод при магматической активизации: на примере скважины Е-1, полуостров Камчатка, Россия // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 87–90.
- 5. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
- 6. Kopylova G. Boldina S. Hydrogeological Earthquake Precursors: A Case Study From the Kamchatka Peninsula // Front. Earth Sci. 2020. 8:576017. doi: 10.3389/feart.2020.576017.

# РАЗВЕДКА КИТОЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-419-422

Кузьмичёв Б.В., Кураничева А.И.

AO «Росгео» AO «Урангео» Ангарская геологическая экспедиция, Иркутск, boriskuzmichev@mail.ru

**Аннотация:** В статье приводятся результаты исследований Китойского месторождения пресных подземных вод, расположенного в аллювиальных неоген-четвертичных отложениях, с использованием метода электротомографии. На основе анализа полученных данных показана эффективность метода для стратификации водовмещающих пород и уточнения на стадии доразведки месторождения.

**Ключевые слова:** месторождение пресных подземных вод, аллювиальные отложения, электротомография.

**Abstract:** The article presents the results of studies of the Kitoi fresh groundwater deposit located in alluvial Neogene-Quaternary sediments using the method of electrotomography. Based on the analysis of the data obtained, the effectiveness of the method for stratification of water-bearing rocks and clarification of boundary conditions at the stage of additional exploration of the field is shown.

Key words: fresh groundwater deposit, alluvial deposits, electrotomography.

В нашей стране использование электротомографии рекомендовано Госстроем России [1]. Применение многоканального электрического зондирования признано целесообразным при всех детальных (масштаб 1:2000 и крупнее) геофизических исследованиях — в ходе инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий, при решении экологических задач. Электротомография — высокоразрешающая электроразведка на постоянном токе. Данная методика хорошо зарекомендовала себя при малоглубинных исследованиях геологического разреза [2].

Основной методикой электротомографии являются вертикальные электрические зондирования, нацеленные на изучение горизонтально-слоистых разрезов. В настоящее время эта методика активно внедряется в практику, что позволяет исследовать сложно построенные среды и проводить интерпретацию в рамках двумерных моделей. Благодаря электротомографии можно картировать в разрезе отдельные литологические разности, различающиеся по удельному электрическому сопротивлению, получить объемную модель геолого-геофизического разреза изучаемых участков недр, что дает возможность оценивать распространение и степень изменчивости состава водовмещающих пород продуктивных водоносных горизонтов, а также их граничные условия при поиске и разведке подземных вод. Такие задачи ставились в процессе разведки Китойского месторождения питьевых подземных вод.

Китойское месторождение (рис.1) расположено в 16 км юго-западнее г. Ангарска на правобережье р. Китой в пределах Китойской кайнозойской впадины. Впадина осложнена шестью мелкими депрессиями (переуглубленными участками долины) с мощностью аллювиальных отложений от 29 до 60 м. Месторождение приурочено к юго-восточной части одного из переуглубленных участков протяженностью вдоль русла до 7 км, имеющего ширину 3 км. Он представляет собой нерасчлененную толщу аллювиальных осадков мощностью до 30-40 м от неогенового до современного возраста (рис. 2). Нижняя часть толщи мощностью до 20-30 м является основным эксплуатационным горизонтом (продуктивным) подземных вод. Водовмещающие породы представлены гравийно-валунногалечниковыми образованиями и песками неоген-нижнечетвертичного возраста. Сверху залегают гравийно-галечниковые образования первой надпойменной террасы и поймы р. Китой мощностью до 2-11 м. По данным ранее проведенных геологоразведочных работ они имеют слабую гидравлическую связь с продуктивным водоносным горизонтом. Эксплуатационные запасы подземных вод Китойского месторождения состоят из емкостных (статических) запасов и привлекаемых ресурсов. По состоянию на 2014 г. запасы месторождения составляют 207.667 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

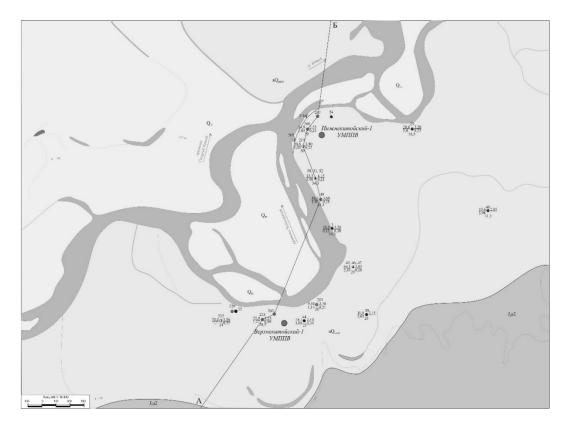


Рис. 1. Гидрогеологическая карта Китойского месторождения питьевых подземных вод.

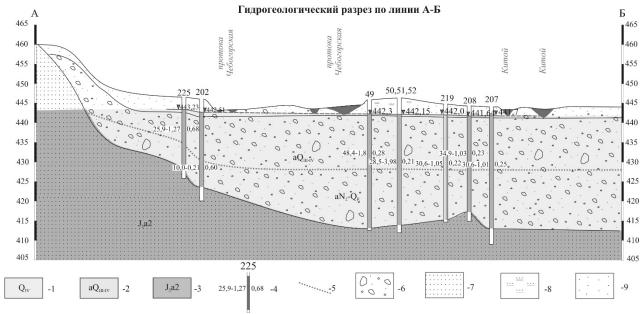


Рис. 2. Гидрогеологический разрез Китойского месторождения питьевых подземных вод. 1 – водоносный горизонт современных аллювиальных отложений: валуны, галечники, пески (пойма); 2 — водоносный горизонт современных верхнечетвертичных аллювиальных отложений (первая надпойменная терраса): галечники, пески, гравий; 3 — второй водоносный ааленский комплекс: песчаники; 4 — гидрогеологическая скважина на разрезе: цифры вверху — номер скважины, у стрелки — абсолютная отметка установившегося уровня воды, м, слева — дебит,  $\pi$ 0 и понижение уровня воды, справа — минерализация подземных вод,  $\pi$ 1 предполагаемая граница водоносного плиоцен-эоплейстоценового горизонта;  $\pi$ 2 — валунногалечные отложения с песчаным заполнителем;  $\pi$ 3 — песчаники;  $\pi$ 4 — супесь;  $\pi$ 5 — пески.

Источником формирования большей части из них являются привлекаемые ресурсы речных вод.

Основным назначением разведочных работ была оценка запасов подземных вод в объеме 90 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Однако освоение месторождения было ограничено площадью, на которой возможно размещение водозабора, поэтому для эффективности проведения геологоразведочных работ перед началом бурения разведочных и наблюдательных скважин выполнена электротомография.

В настоящее время проект разведки в стадии завершения, согласно графику работ сдача отчета с подсчетом запасов во втором квартале 2021 г.

Электроразведочные профили были заложены в пределах территории Китойского месторождения питьевых подземных вод, на участках Верхнекитойский и Нижнекитойский, где в конце 60-х г. прошлого столетия были проведены поисково-разведочные работы на подземные воды [3], в последующие годы выполнен подсчет эксплуатационных запасов по состоянию на 01.01.1994 [4], а в 2014 г. составлен отчет по объекту «Оценка состояния месторождений питьевых и технических подземных вод в нераспределенном фонде недр...». Качество подземных вод в процессе всех работ соответствовало питьевым требованиям. В 2020 г. на основании лицензии на пользование недрами проведена разведка этих участков для организации питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения населения Ангарского городского округа. Для проведения площадных геофизических работ использовался многоканальный многоэлектродный электроразведочный комплекс «Омега-48». Расстояние между электродами принято 5 м. Общее количество электродов 48, длина расстановки 235 м. Такие параметры позволили достичь оптимальной глубины исследования до 40–50 м.

В результате наземных геофизических исследований определены мощности современных четвертичных отложений, продуктивного водоносного горизонта, изменчивость литологического состава, граница коренных пород, участки концентрации солоноватых вод.

Водоносный горизонт современных четвертичных ( $Q_{\text{III-IV}}$ ) аллювиальных отложений имеет наиболее высокие сопротивления пород и его изменчивость. Сопротивления варьируются от первых сотен до первых тысяч  $Om \times m$ , в среднем составляя около тысячи  $Om \cdot m$ . В разрезе валуны и галечники с песчано-гравийным заполнителем. Мощность отложений около 10–12 м.

Ниже залегает неоген-четвертичный  $(N_2-Q_E)$  водоносный горизонт, сложенный валунно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем. Породы имеют сопротивления первые сотни  $Om \times m$ . На участках, где в заполнителе присутствует пылеватоглинистая составляющая, сопротивление водовмещающих пород уменьшается до первых десятков  $Om \cdot m$ . Мощность горизонта до 10 m.

Оба горизонта объединяются в единый водоносный комплекс неоген-четвертичных отложений (N-Q) и являются основным эксплуатационным гидрогеологическим подразделением (см. рис.1). Гидрогеологические параметры водоносного комплекса, полученные в ходе проведенных опытно-фильтрационных работ, достаточно однородны по всей площади. Коэффициент фильтрации 105–114 м/сут, водопроводимость 1657–2230 м²/сут, гравитационная водоотдача от 0.14 до 0.20 ед.

Коренные породы, представленные юрскими песчаниками и алевролитами, имеют наименьшие сопротивления, составляющие первые десятки Ом×м, несмотря на низкие фильтрационные показатели. Это связано с тем, что коренные породы сильно выветрелые и имеют солоноватые воды. Например, на участке Верхнекитойский вскрыты воды, минерализация которых превышала 3 г/л, наблюдалось высокое содержание железа и марганца, в некоторых случаях жесткость подземных вод превышала 7 ммоль/л. В ряде скважин на Нижнекитойском участке на глубине 26–30 м вскрыты также воды, по своему составу отличающиеся от состава подземных вод продуктивного горизонта. В связи с этим глубина бурения следующих скважин водозабора была уменьшена по данным электротомографии, а также корректировались места их расположения.

Результаты многоканального электрического зондирования, проведенного на Китойском месторождении питьевых подземных вод после заверки их путем бурения скважин, проведения опытно-фильтрационных исследований и гидрогеохимического опробования, позволили разработать и организовать оптимальную схему водозабора с обоснованием глубин и мест расположения водозаборных скважин, подготовить отчет с подсчетом запасов. Кроме этого, на основании выполненных разведочных работ было установлено, что значительное повышение производительности водозабора (обосновано полученными гидрогеологическими параметрами) возможно на участках отдельно расположенных скважин путем организации узлов из нескольких взаимодействующих скважин. Для разработки схемы узлов предусматривается использовать объемную модель геолого-геофизического разреза, полученного на основании данных электротомографии.

Использование электротомографии в процессе поисков и разведки подземных вод является весьма эффективным и малозатратным, что повышает качество и информативность геологоразведочных работ. Эффективность использования этого метода наземных геофизических исследований получила подтверждение на примере разведки Китойского месторождения питьевых подземных вод.

- 1. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть І. Общие правила производства работ. Одобрен Департаментом развития научно-технической политики и проектно-изыскательских работ Госстроя России (письмо от 14 октября 1997 г. № 9-4/116). Принят и введён в действие с 1 марта 1998 г.
- 2. Бобачёв А.А. Электротомография методом сопротивлений и вызванной поляризации // Приборы и системы разведочной геофизики. 2006. № 2. С. 1–10.
- 3. Ткаченко И.А. и др. Отчет о результатах работ по разведке пресных подземных вод для водоснабжения г. Ангарска. (отчет Суховского гидрогеологического отряда за 1967–70 гг. в 3-з томах)». Иркутск, 1971. ТГФ.
- 4. Лумпов И.А. Отчет о результатах ревизионно-заверочных работ на Китойском месторождении пресных подземных вод с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 01.01.94. Иркутск, 1994. ТГФ.

# О ПРИМЕНЕНИИ МЕТОДА АТОМНО-ЭМИССИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ В ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-423-426

Озёрский А.Ю. 1,2

<sup>1</sup>AO «Красноярская горно-геологическая компания», Красноярск, ozerski@krasgeo.ru <sup>2</sup> AO «МОНИТЭК», Красноярск, ozerski@krasgeo.ru

Аннотация. Рассматривается «Методика выполнения измерений массовой концентрации элементов в пробах питьевой, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой» ПНД 14.1:2:4.135-98. Неправильная подготовка проб к анализу приводит к необоснованно завышенным концентрациям катионов. Предлагается считать метод неприемлемым для изучения химического состава вод в гидрологических и геологических (гидрогеологических) работах.

Ключевые слова: ИСП-спектрометрия, гидрохимия, ионы, достоверность.

**Abstract.** The article considers Methods for measuring the mass concentration of elements in samples of drinking, natural, wastewater and atmospheric precipitation by the method of atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma. PND 14.1: 2: 4.135-98. Incorrect preparation of water samples for analysis leads to unreasonably high concentrations of cations. This method is recommended to be unacceptable for studying the water chemical composition in hydrological and geological (hydrogeological) surveys.

Key words: ICP-spectrometry, hydrochemistry, ions, reliability.

### Введение

Представление об ионном составе природных, в том числе подземных, вод было сформировано на основе титриметрического химического анализа. Этот анализ основан на положениях химической теории и дает объективные и достоверные данные о концентрациях ионов, содержащихся в природных водах. В результатах этого анализа находит подтверждение теория об электронейтральности водных растворов и балансе катионов и анионов. Наличие баланса (равенства сумм эквивалентных масс анионов и катионов) служит надежным доказательством выявления в воде всех растворенных веществ и правильности выполненных анализов [1, 2].

Кроме этого, эквивалентные массы дают нам возможность определить процентную долю каждого иона, дать наименование гидрохимическим типам и классам вод, систематизировать результаты, используя графики А.М. Пайпера [3], С.А. Дурова [4], Е.В. Посохова и др.

Однако с 1990-х гг. титриметрический метод анализа стал постепенно уступать место современным методам, основанным не на химических, а на физических процессах.

В итоге в последние годы в геологических отчетах и в другой гидрохимической документации стали появляться лабораторные результаты анализа природных вод, вызывающие серьезные сомнения в их достоверности.

Авторы отчетных материалов, по-видимому, не имеют представлений ни о методе анализов, ни о проверке результата через баланс анионов и катионов. Они слепо доверяются коммерческим лабораториям, которые «вооружены» аттестатами, сертификатами и прочими документами. При этом специалисты лабораторий, выдавших пользователю недостоверные результаты, уверены, что они работают строго по нормативам и их данные правильны.

Рассмотрение недостоверных результатов показывает, что они проявляются в основном в определении концентраций катионов и возникают при применении «Методики выполнения измерений массовой концентрации элементов в пробах питьевой, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой» ПНД 14.1:2:4.135-98 [5], которая далее именуется Методика.

# Использованные материалы и их интерпретация

Рассмотрение результатов химических анализов природных и техногенных вод входит в обязанности автора по месту работы, а также при его экспертной деятельности в Красноярском филиале ФБУ «ГКЗ». Кроме этого, с результатами анализов обращаются за консультацией природо- и недропользователи. За 2020 г. были рассмотрены свыше 60 химических анализов воды, пробы которых были отобраны из разнообразных водных объектов и проанализированы различными лабораториями.

Лаборатории представляют содержание главных компонентов химического состава воды в мг/дм<sup>3</sup>. При проверке проводился пересчет результатов в мг-экв/дм<sup>3</sup> путем деления концентрации в мг/дм<sup>3</sup> на эквивалентную массу соответствующего иона. После этого вычислялись и сравнивались суммы катионов и анионов. Если анализы катионов были выполнены по *Методике* ПНД 14.1:2:4.135-98 [5], то суммы катионов примерно в трети проб значительно (в 1.5 –2 раза и более) превышали суммы анионов, что говорило о получении недостоверных результатов по причине неправильно выбранной методики измерений.

Кроме этого, выполнялось сравнение лабораторных концентраций ионов с опубликованными фоновыми данными [6] и химическим составом вод в объектах-аналогах. При этом концентрации катионов в большинстве случаев превышали фоновые показатели и их концентрации в аналогах. Однако для концентраций анионов не наблюдалось существенных отклонений от фоновых значений. Анионы не анализируются методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, для их анализа в наши дни используются другие методы: хроматографии, капиллярного электрофореза и др.

Выявление причин наблюдаемого явления потребовало изучения опубликованной *Методики* анализа [5] и других нормативных документов [7, 8].

# Обсуждение результатов

В вводной части Методики [5] написано, что этот документ «устанавливает методику выполнения измерений (МВИ) массовой концентрации алюминия, бария, бериллия, бора, ванадия, висмута, вольфрама, железа, кадмия, калия, кальция, кобальта, кремния, лития, магния, марганца, меди, молибдена, мышьяка, натрия, никеля, олова, свинца, селена, серебра, серы, стронция, сурьмы, таллия, титана, фосфора, хрома, цинка в пробах питьевой, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-АЭ)».

На титульном листе документа написано прописными буквами, что методика представляет *«количественный химический анализ вод»*, хотя, строго говоря, к химическим анализам данный метод не относится.

Методика утверждена Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды (Госкомэкологией РФ) и «допущена для целей Государственного экологического контроля». Иных целей использования, по-видимому, Методика не предусматривает.

Наиболее существенные претензии вызывает часть *Методики*, описывающая процесс подготовки водных проб. Во всех предусматриваемых случаях, в пробу воды «не содержащую заметных глазом взвешенных частиц, добавляют концентрированную азотную кислоту из расчета 2.0 см³ азотной кислоты на 100 см³ воды, раствор тщательно перемешивают и выдерживают не менее 2 ч». Таким образом, если в водной пробе химические элементы также находятся в форме коллоидов или нерастворенных взвешенных твердых частиц, то добавление концентрированной азотной кислоты растворяет все формы химических элементов. В спектрометре анализируется не природная вода, а азотно-кислый раствор элементов, не все из которых ранее находились в воде в форме ионов, поэтому рассматриваемый метод показывает валовые (максимальные) концентрации химических элементов, находившихся в водной пробе в формах ионов, коллоидов и взвешенных частиц. В итоге возникает существенное повышение концентраций катионов, не соответствующее истинному содержанию растворенных веществ и ионному балансу растворов.

В приведенных ниже примерах, взятых из трех совершенно различных водных систем и проанализированных тремя различными лабораториями, суммы катионов в 1.7–2.4 раза выше сумм анионов (таблица). При этом в двух примерах не определялись такие широко распространенные ионы, как натрий и магний, т.е. реальные суммы катионов существенно выше показанных.

Примеры ионных балансов в различных водных объектах при анализе катионов методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой

	Грунтові	ые воды в	Подземные воды под		Речные воды, р.	
Компо-	частной з	астройке,	полигоном бытовых		Удоронга, Енисейский	
ненты	Красн	юярск	отходов, Красноярск		кряж	
	$M\Gamma/дM^3$	$M\Gamma$ -экв/д $M^3$	$M\Gamma/дM^3$	$M\Gamma$ -ЭКВ/Д $M^3$	$M\Gamma/дM^3$	мг-экв/дм <sup>3</sup>
Cl <sup>-</sup>	44.5	1.25	200	5.6	0.88	0.025
$\mathrm{NO_{3}^{-}}$	20.8	0.34	0	0	0	0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	99	2.06	72	1.50	2.37	0.049
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	220.2	3.61	616	10.10	56.4	0.925
Сумма	_	7.3	_	17.23	_	1.00
анионов		7.5		17.25		1.00
$\mathrm{NH_4}^+$	0	0.0	0.37	0.02		_
Fe общ	15.7	0.84	6.2	0.33	1.22	0.065
Ca <sup>2+</sup>	149	7.4	436	21.8	37.67	1.880
$Mg^{2+}$	48.4	4.0	79	6.50	Не определяли	
Na <sup>+</sup>	119	5.2	Не определяли		6.23	0.271
Сумма катионов	_	17.4	-	28.61	_	2.22

Приведенных данных, с нашей точки зрения, вполне достаточно, чтобы не рекомендовать *Методику* ПНД 14.1:2:4.135-98 в гидрологических и геологических (гидрогеологических) работах.

Может ли данная *Методика* показать не валовые содержания элементов, а их ионные формы? Такая возможность предусмотрена, так как в документе записано: *«если требуется определение растворенных форм элементов, то пробы предварительно фильтруют через мембранный фильтр или бумажный фильтр «синяя лента».* Применение мембранных фильтров с размером пор 0.45 мкм существенных возражений у нас не вызывает, так как, согласно ГОСТ 31861-2012, *«растворенный» означает, что определяемый показатель проходит через фильтр размером пор 0.45 мкм»* [7].

Однако применение фильтров «синяя лента», имеющих размеры пор по данным разных производителей от 1 до 5 мкм, не может избавить пробу воды от коллоидных и тонко дисперсных взвешенных частиц. В результате применения фильтров «синяя лента» данный метод анализа не может определить точное содержание растворенных веществ, что делает весь анализ лишенным экологического смысла. Предельно допустимые концентрации многих химических элементов рассчитаны именно для их растворенных (ионных) форм [8].

Допущение *Методикой* фильтров «синяя лента» для анализа ионов, с нашей точки зрения, сделано намеренно, с той целью, чтобы содержание всех катионов, в том числе нормированных элементов, было выше.

Методика [5] разработана и утверждена «для целей Государственного экологического контроля» тем самым ведомством, которое и осуществляет этот контроль (сейчас это Росприроднадзор). Фискальный характер работы этого ведомства общеизвестен и для того, чтобы штрафы для наполнения бюджета были побольше, концентрации элементов должны быть повыше, благодаря фильтру «синяя лента».

Вместе с тем было бы неправильно относить получаемые недостоверные результаты анализов на счет одной только *Методики* ПНД 14.1:2:4.135-98. В соответствии с ГОСТ 31861-2012 фильтрование через мембранные фильтры с размером пор 0.45 мкм требуется уже при отборе проб [7]. К сожалению, большинство организаций, изучающих водные объекты, не фильтруют отобранные водные пробы ни через мембранные фильтры, ни, хотя бы, через фильтры «синяя лента».

#### Заключение

- 1. Использование *Методики* ПНД 14.1:2:4.135-98 позволяет показывать валовые концентрации химических элементов, содержащихся в воде во всех формах: растворенной коллоидной и взвешенной твердой.
- 2. Концентрации растворенных форм катионов *Методика* ПНД 14.1:2:4.135-98 определяет недостоверно, если не проводилась фильтрация проб через мембранный фильтр 0.45 мкм. Даже при наличии такой фильтрации можно выразить сомнение в том, что данный анализ определит именно растворенные формы (ионы), а не другие формы присутствия элементов в воде, так как спектрометрический метод принципиально не может анализировать ионы.
- 3. Методику ПНД 14.1:2:4.135-98 не рекомендуется применять для изучения химического состава вод в гидрологических и геологических (гидрогеологических) работах.
- 4. Для гидрохимических исследований рекомендуется применять классические лабораторные методы, дающие достоверные результаты: титриметрический, спектрофотометрический и др.
- 5. Рекомендуется предприятиям и организациям, изучающим природные и техногенные воды с различными целями, в том числе с целью экологического контроля, обязательно фильтровать отобранные пробы через мембранный фильтр 0.45 мкм или, хотя бы, через фильтр «синяя лента». Фильтрование проб позволит получить объективные данные и, возможно, снизит необоснованный уровень претензий природоохранных органов за загрязнение водной среды.

- 1. Резников А. А., Муликовская Е. П., Соколов И. Ю. Методы анализа природных вод Изд. 3-е, переработ. и доп. М.: Недра, 1970. 488 с.
  - 2. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 541 с.
- 3. Piper A.M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis // Am. Geophys. Union Trans. 1944. V. 25. 914–923.
- 4. Дуров С.А. Треугольная форма графического выражения результатов водных анализов и применение ее к классификации природных вод // Гидрохимические материалы. 1949. Т. 17. С. 54–61.
- 5. Методика выполнения измерений массовой концентрации элементов в пробах питьевой, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. ПНД 14.1:2:4.135-98. Утв. Госкомэкологией РФ 25.06.1998 г. М.: Госкомэкология России, 1998. 27 с.
  - 6. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.
  - 7. ГОСТ 31861-2012. Вода. Общие требования к отбору проб. М.: Стандартинформ, 2013. 60 с.
- 8. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.1.4.1074—01. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002. 103 с.

# КАРТИРОВАНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГОРИЗОНТОВ-КОЛЛЕКТОРОВ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ) МЕТОДОМ МАЛОГЛУБИННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗОНДИРОВАНИЙ МЗСБ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-427-429

Оцимик А.А. $^{1,2}$ , Токарева О.В. $^1$ , Ильин А.И. $^{1,2}$ , Буддо И.В. $^{1,2,3}$ , Лапаев В.А. $^4$ , Белыш А.В. $^4$ , Бощенко А.Н. $^4$ 

<sup>1</sup>OOO «СИГМА-ГЕО», Иркутск, oaa@sigma-geo.ru <sup>2</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск <sup>3</sup>Иркутский научный центр СО РАН, Иркутск <sup>4</sup>OOO «Газпромнефть-Заполярье», Тюмень

Аннотация. Метод малоглубинных зондирований становлением поля в ближней зоне зарекомендовал себя как эффективный способ картирования водоносных горизонтов на территории Якутии, где толща многолетнемерзлых пород способна негативно влиять на водообильность коллекторов, развитых в верхней части разреза. Для картирования распространения многолетнемерзлых пород и положения водонасыщенных коллекторов были выполнены малоглубинные электроразведочные работы, позволяющие изучить геоэлектрическое строение разреза до глубины 500 м. Актуальность исследования продиктована необходимостью поиска источников технического водоснабжения для использования при бурении нефтяных скважин, организации системы поддержания пластового давления и производственно-технических нужд при подготовке нефти.

**Ключевые слова:** многолетнемерзлые породы, верхняя часть разреза, водоносный горизонт, малоглубинные зондирования становлением поля в ближней зоне, удельные электрические сопротивления.

**Abstract.** The transient electromagnetic method in the near field zone in shallow mode has established itself as an effective method for mapping aquifers in the territory of Yakutia. This is well known that in this region permafrost rocks can negatively affect the water availability of reservoirs developed in the upper part of the section. To map of the permafrost distribution and the position of water-bearing reservoirs the transient electromagnetic method in the near field zone survey was carried out, capable of studying the geoelectric structure of the section to depths of 500 m. The relevance of the study is due to lack of technical water for reservoir pressure maintenance.

**Key words:** permafrost rocks, the upper part of the section, aquifer, shallow transient electromagnetic soundings in the near field zone, electrical resistivity.

# Объект исследований

Объектом исследования является участок площадью 176 км<sup>2</sup>, приуроченный к крупному нефтегазоконденсатному месторождению на территории Ленского и Мирнинского районов Республики Саха (Якутия). В тектоническом отношении месторождение находится в северо-восточной части Непского свода, осложняющего Непско-Ботуобинскую антеклизу, в зоне сочленения его с Мирнинским выступом и Нюйско-Джербинской впадиной. В геологическом строении исследуемого интервала разреза принимают участие отложения чарской, ичерской, метегерской свит нижнего и среднего кембрия и бордонской свиты среднего и верхнего кембрия. На водораздельных поверхностях частично сохранены карбонатные отложения ордовика и терригенные образования юры. По долинам рек развиты аллювиальные образования четвертичной системы. Строение осадочного чехла осложнено как тектоническими нарушениями, так и проявлениями магматизма в виде пластовых трапповых тел и даек среднепротерозойского возраста Вилюйско-Мархинского комплекса.

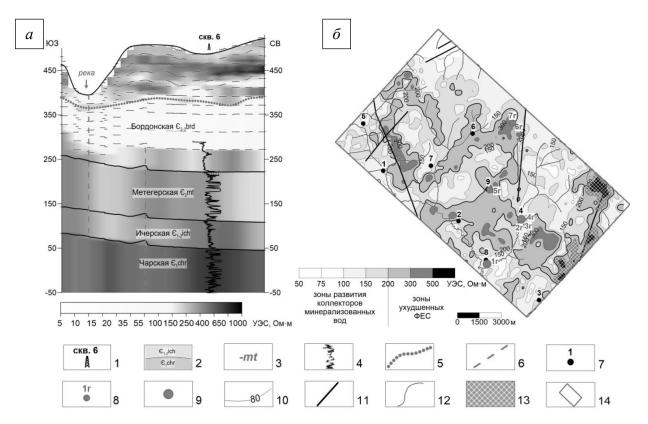
В криогеологическом плане территория расположена в пределах Лено-Анабарской геокриологической провинции [1, 2]. Район исследований характеризуется относительно глубоким залеганием криолитозоны — подошвы зоны отрицательных температур. Глубина нулевой изотермы может превышать 225 м, в зонах развития таликов — сокращаться до 80 м. Верхний ярус криолитозоны — собственно многолетнемерзлые породы (ММП) — на территории исследований, по данным [3], имеет сплошное распространение и мощность от 100 до 200 м.

# Распространение ММП и водоносных коллекторов по данным мЗСБ

Подход к картированию коллекторов минерализованных вод основан на комплексном анализе геолого-геофизических данных. Результаты сейсморазведочных работ методом отраженных волн общей глубинной точки (МОВ ОГТ) 3D характеризуют структурно-

тектонические особенности участка исследований и позволяют определить области наличия интенсивной трещиноватости. По результатам исследований мЗСБ, бурения скважин и данным геологической съемки возможно картировать распространение ММП, коллекторов, насыщенных минерализованными водами, участков вторичного изменения пород, связанных с тектоническими нарушениями и проявлениями магматизма. Комплексный анализ вышеперечисленных методов дает возможность рекомендовать участки заложения скважин для целей технического водоснабжения, прогнозировать интервалы возможных осложнений при бурении.

На основе данных о геоэлектрическом строении разреза до глубины 500 м авторам удалось изучить строение верхнего яруса ММП. В разрезе ММП характеризуются повышенными значениями УЭС  $-100-250~{\rm Om}\cdot{\rm m}$  [4, 5], их мощность подчиняется геоморфологическим особенностям исследуемой территории - сокращается от  $140-200~{\rm m}$  на водоразделах до  $20-40~{\rm m}$  в долинах рек (рисунок, a). На отдельных участках предполагаемого развития сквозных таликов приповерхностный высокоомный слой, связываемый с промороженными породами, отсутствует. По данным мЗСБ, основная часть изученной территории находится в зоне сплошного распространения верхнего яруса ММП - преобладающие значения прогнозной мощности составляют  $80-120~{\rm m}$ .



Породы бордонской свиты, подстилающие высокоомный слой, в представленном районе зачастую также находятся в охлажденном состоянии и в рамках исследования не рассматривались как перспективный объект для поиска источника водоснабжения.

Перспективным для данных целей является подмерзлотный водоносный комплекс трещинно-пластовых вод отложений метегерской и ичерской свит. Данный комплекс характеризуется повсеместным распространением, вмещает напорные воды. В разрезе карбонатных отложений скважинами вскрываются пласты, обладающие достаточно высокой водообильностью и обеспечивающие водопритоки до 3.3–6.7 л/с. По данным химического анализа минерализация вод комплекса в скважинах участка изменяется от 0.05 до 12.42 г/л.

При анализе результатов бурения гидрогеологических скважин отмечается, что продуктивные скважины приурочены к областям пониженных значений УЭС отложений метегеро-ичерского комплекса (рисунок, б). Ухудшение фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) ожидается преимущественно в приразломных зонах и предположительно связывается с вторичными преобразованиями пород (засолонением, карбонатизацией). Данные неблагоприятные зоны широко представлены на северо-западе, в центральной части площади и на юго-востоке, имеют ориентировку, согласную простиранию основных разломов, прослеженных с дневной поверхности. В поле геоэлектрических характеристик, по данным мЗСБ, осложненные зоны проявляются повышенными значениями продольного сопротивления, при испытаниях скважин – низкодебитными притоками пластовой воды.

Наиболее перспективные для вскрытия подземных вод зоны закартированы под долинами рек — значения УЭС в них минимальные на всей исследованной территории (от 50 − 75 до 100 Ом·м). По результатам интерпретации данных мЗСБ были рекомендованы участки заложения гидрогеологических скважин, отмечены интервалы возможных осложнений при бурении, связанных с многолетней мерзлотой.

#### Выводы

Применение малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ на территории исследований позволило решить ряд геологических задач: изучить морфологию толщи ММП, закартировать участки вторично преобразованных пород в результате процессов тектонической активизации, выделить прогнозные зоны распространения водонасыщенных коллекторов и определить перспективные участки для расширения контура гидрогеологической изученности территории бурением.

По результатам исследований сделан вывод о том, что в изучаемом районе строение толщи ММП подчинено особенностям геоморфологического и тектонического строения. Мощность мерзлоты способна достигать первых сотен метров на водораздельных поверхностях, сокращаться в долинах рек, тектонически активных зонах, прерываться на участках развития сквозных таликов.

- 1. Алексеев С.В. Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 319 с. ISBN: 978-5-9747-0168-9.
- 2. Вожов В.И. Основы гидрогеологического прогноза нефтегазоносности Сибирской платформы // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2002. № 9. с. 8–13
- 3. Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист Р-48, 49 Ванавара. Объяснительная записка. Л., 1990. 139 с.
- 4. Валеев Р.Р., Колесников Д.В., Буддо И.В., Ильин А.И., Аксеновская А.А., Черкасов Н.А., Агафонов Ю.А., Гринченко В.А. Подход к решению проблемы дефицита воды для системы поддержания пластового давления нефтяных месторождений Восточной Сибири (на примере Среднеботуобинского НГКМ) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений, январь (1) 2019. С. 55–67, DOI: 10.30713/2413-5011-2019-1-55-67.
- 5. Sharlov M.V., Buddo I.V., Misyurkeeva N.V., Shelokhov I.A., Agafonov Yu.A. Transient electromagnetic surveys for high resolution near-surface exploration: basics and case studies // First break. Vol. 35, No 9. September 2017 P. 63–71. https://doi.org/0.3997/1365-2397.35.9.90112.

# ДИНАМИКА ПОСТУПЛЕНИЯ МАГМАТИЧЕСКОГО ГАЗА В МУТНОВСКИЙ ПРОДУКТИВНЫЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЙ РЕЗЕРВУАР (КАМЧАТКА)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-430-433

Поляков А.Ю., Кирюхин А.В., Журавлев Н.Б.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, pol@kscnet.ru

Аннотация. Изменение содержания неконденсированного газа (НКГ) на турбогенераторе геотермальной электростанции отражает усредненные характеристики изменения притока магматических газов в продуктивный геотермальный резервуар в целом. Полученные результаты показывают реальную возможность использования данных по парциальному давлению НКГ на конденсаторе ГеоЭС для прогноза магматической активности Мутновского вулкана.

Ключевые слова: НКГ, мониторинг, магматический газ, геотермальный резервуар, вулкан.

**Abstract.** The change in the content of non-condensed gas (NCG) at the turbine generator of a geothermal power plant represents the average characteristics of the change in the inflow of magmatic gases into the productive geothermal reservoir as a whole. The results obtained show the real possibility of using data of the partial pressure of the NCG at the GeoPP condenser for predicting the magmatic activity of the Mutnovsky volcano.

Keywords: NCG, monitoring, magmatic gas, geothermal reservoir, volcano.

# Введение

Непрерывные измерения содержания неконденсированного газа (НКГ) на турбогенераторе геотермальной электростанции проводились с целью наблюдений за динамикой поступления магматического газа в продуктивный геотермальный резервуар в связи с прогнозом активности Мутновского вулкана и сильных землетрясений. Работа является продолжением исследований, опубликованных в [1, 2].

# Удаленный мониторинг

Система дистанционного мониторинга создана на базе станции НОВО RX 3000 (3). В состав системы контроля параметров окружающей среды входят: датчик атмосферного давления (1) (S-BPB-CM50), датчик влажности и температуры (2) (S-THB-M008).

Для измерения парциального НКГ (большая часть газосодержания —  $CO_2$ ) в конденсаторе турбины геотермальной электростанции был использован датчик давления (4), диапазон измерений -1–0 бар, точность измерения  $\pm 0.5$  %, и датчик температуры (5), диапазон измерений  $-40 \sim 110$  °C точность измерения  $\pm 0.5$  %.

Программная web-платформа HOBOlink используется для доступа к текущим и сохраненным данным в Интернете посредством GSM/3G связи.

# Результаты работы системы дистанционного мониторинга

Тестирование системы дистанционного мониторинга осуществлялось в течение 30 дней. Для оценки парциального  $P_{\rm CO2}$  были проведены одновременные измерения давления конденсата пара  $P_{\rm c}$  и его температуры  $T_{\rm c}$ ; затем  $P_{\rm CO2}$  рассчитывали как разницу между  $P_{\rm c}$  и давлением насыщения водяного пара, соответствующим температуре  $T_{\rm c}$ , зависимость была определена аппроксимацией табличных данных.

Наблюдаемое временное изменение  $P_{\rm CO2}$  в течение периода наблюдений с 23.08.2019 г. по 25.09.2019 г. [3] показывает, что, по меньшей мере, 14 максимумов  $P_{\rm CO2}$  синхронизированы с 14 минимумами  $T_{\rm c}$ , которые демонстрируют поступление неконденсируемого газа в турбину из эксплуатационного геотермального резервуара. Некоторые из этих пиков  $P_{\rm CO2}$  могут быть связаны с импульсами разгрузки магматического газа, описанными в [4].

# Усиление магматической активности Мутновского вулкана в 2020 г.

Отметим признаки магматического происхождения состава газа, отобранного на добычных скважинах и термопроявлениях Мутновского геотермального месторождения, особенно на участках продуктивного резервуара, примыкающих к зонам магматической инжекции [5].

Значения  $\delta^{13}$ С (CO<sub>2</sub>) в скважинах 022, 031, 035, A4 и R27, термопроявлениях Медвежьи и Верхнемутновские Мутновского геотермального месторождения варьируются в диапазоне от -8.4 до -5.6 %, что свидетельствует о магматическом происхождении CO<sub>2</sub> [5].

Исследование гипоцентрального поля землетрясений проведено на основе анализа плоскоориентированных кластеров [6]. Данное направление важно для определения связи гипоцентрального поля сейсмоактивной среды и ее геолого-тектонического строения в виде плоских сейсмогенных разломов, предположительно активируемых глубинными флюидами. Такое представление позволяет концептуально объяснить многие эффекты сейсмичности: ее цикличность, влияние и взаимосвязь удаленных сильнейших, в том числе глубоких, землетрясений, выявленную связь сейсмичности и вулканизма.

В апреле-июле 2020 г. на Мутновском геотермальном месторождении регистрировалось значительное увеличение числа микроземлетрясений (порядка 300, при среднегодовом около 250).

Гидрогеомеханический анализ локальной сейсмичности в пределах Мутновско-Гореловской группы вулканов за этот период выполнен с использованием ПО Frac-Digger (RU #Reg. 2016616880) и параметров выявления кластеров сейсмогенных площадок. В результате данного анализа выявлена инжекция магмы из Мутновского вулкана в виде девяти даек на глубинах от 0 до –4 км (рис. 1).

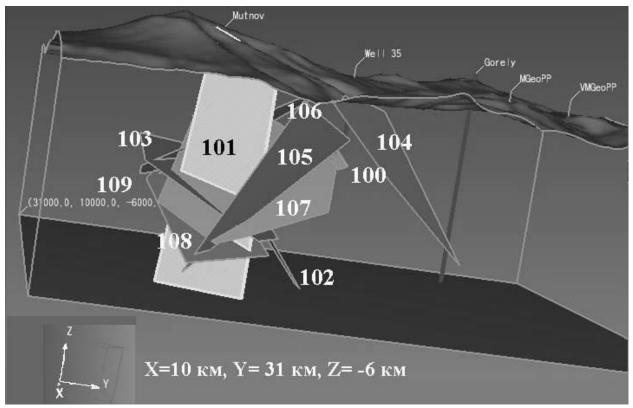


Рис. 1. Геометрия инжекций магмы под Мутновским вулканом по сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН за период с 01.04.2020 по 02.08.2020 г., цифрами указаны номера даек (на рис. 2.).

# Определение содержания НКГ на турбогенераторе геотермальной электростанции по технологическим данным ГеоЭС

Согласно технологическому процессу эксплуатации ГеоЭС, на сепараторе турбогенератора производится регистрация температуры и давления с сохранением данных на внешний носитель.

Результат обработки данных  $\Gamma$ ео $\Theta$ С приведен на рис. 2, где прямоугольник – погрешность определения НКГ. Нами выявлено 11 интервалов времени с аномальными (повышенными) значениями  $P_{CO2}$ .

На тот же график рис. 2 вынесено время начала инжекций магмы в северо-восточном секторе Мутновского вулкана с указанием магнитуды микроземлетрясений. Сопоставление магматической активности и аномалий  $P_{\rm CO2}$  показывает синхронизацию инжекций магмы (100, 101, 102, 104, 107, 108, 109) с аномалиями  $P_{\rm CO2}$  (A-F).

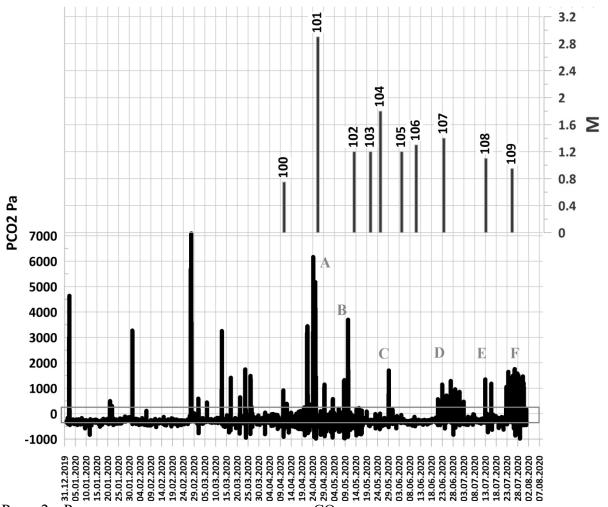


Рис. 2. Расчетное парциальное давление  $CO_2$  в конденсаторе на выходе из турбины геотермальной электростанции.  $PCO_2$  — парциальное давление НКГ в конденсаторе турбины геотермальной электростанции, M — магнитуда микроземлетрясений, число  $(100{\text -}109)$  — номер кластера (магматической инжекции),  $A{\text -}F$  — аномалии  $P_{CO2}$ , прямоугольник — погрешность определения НКГ.

#### Выводы

Результаты тестовой работы системы дистанционного мониторинга измерения НКГ с 23.08.2019 г. по 25.09.2019 г. показали изменения усредненного суммарного содержания НКГ на турбогенераторе ГеоЭС, что может характеризовать как технологические изменения (подключения/отключения добычных скважин, герметичность турбогенератора), так и изменения притока магматических газов в продуктивный геотермальный резервуар (дренируемый добычными геотермальными скважинами) в целом.

По данным технологических измерений за период 01.01.—30.07.2020 г. выявлена связь между значимыми аномалиями парциального давления НКГ в конденсаторе турбины геотермальной электростанции и магматическими инжекциями.

Полученные результаты показывают реальную возможность использования данных по парциальному давлению НКГ на конденсаторе ГеоЭС для прогноза магматической активности Мутновского вулкана. У побережья Камчатки в районе Мутновского вулкана располагается важная для сейсмологических исследований сейсмоактивная область. Согласно данным долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) по методу С.А. Федотова, эта область относится к сейсмической бреши — наиболее вероятному месту следующего сильнейшего ( $M \ge 7.7$ ) землетрясения на Камчатке. Его сейсмический эффект в городе может достигать 8 баллов [7].

Согласно этому прогнозу на период XII 2020 г. – XI 2025 г., вероятность такого землетрясения составляет около 20 %, что в несколько раз выше средней долговременной такой вероятности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке  $P\Phi\Phi U$  и ЯОПН в рамках научного проекта № 21-55-50003 Я $\Phi$  а «Магматический фракинг и флюидные потоки в вулканических структурах».

#### Список литературы

- 1. Кирюхин А.В., Лесных М.Д., Поляков А.Ю. Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 51–60.
- 2. Кирюхин А.В., Корнеев В.А., Поляков А.Ю. О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 3–11.
- 3. Поляков А.Ю. Удаленный мониторинг динамики поступления магматического газа в геотермальный резервуар на базе станции НОВО RX 3000 // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020), 3–8 сентября 2020 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 90–93.
- 4. Kiryukhin A., Chernykh E., Polyakov A. et al. Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations // Geosciences. 2020. 10, 52. P. 1–16, DOI: 10.3390/geosciences10020052.
- 5. Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Usacheva O.O. et al. Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. P. 36–55.
- 6. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Соломатин А.В. и др. Геомеханическая интерпретация сейсмичности на шельфе Камчатки: приложения для сейсмического прогноза и поиска углеводородов // Геомодель 2018. 20-я юбилейная конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. Геленджик, Россия. 10–14 сентября 2018 г. 2018. С. 5.
- 7. Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019-V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017–V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 6–22.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ГЕОФИЛЬТРАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ТЕРРИТОРИЙ С РАСЧЛЕНЕННЫМ РЕЛЬЕФОМ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-434-438

Рыбников П.А. $^{1,2}$ , Смирнов А.Ю. $^{1,2}$ 

 $^{1}$  Институт горного дела Уральского отделения PAH, Екатеринбург, ribnikoff@yandex.ru  $^{2}$  Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, alexsm94@gmail.com

Аннотация. Качество гидрологического и гидрогеологического моделирования неразрывно связано с необходимостью иметь достоверную цифровую модель рельефа (ЦМР). Наряду с топографическими материалами и результатами полевых измерений для построения цифровых моделей рельефа могут быть использованы данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Такие данные требуют предварительной обработки и заполнения бессточных областей. Установлено, что при использовании данных ДЗЗ в районах с расчлененным рельефом обнаруживается высотная ошибка до 65 м в долинах рек и на участках с крутым склоном. Для минимизации данных ошибок предлагается включение в ЦМР релевантных данных посредством сгущения облака точек и интерполяции методом кригинга. Предложенная методика позволяет повысить достоверность прогноза с помощью геофильтрационного моделирования, например точно определить зоны подтопления при отключении шахтного водоотлива и затоплении щахтных полей угольных бассейнов.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, SRTM, DEM, уровенная поверхность, высотная ошибка.

**Abstract.** The quality of hydrological and hydrogeological modeling is inextricably linked to the need to have a reliable digital elevation model (DEM). Along with topographic materials and the results of field measurements, data of remote sensing of the Earth (ERS) can be used to build digital elevation models. Such data requires preprocessing and filling of non-drain areas. It has been established that when using remote sensing data in areas with a dissected relief, an altitude error of up to 65 meters is found in river valleys and areas with a steep slope. To minimize these errors, it is proposed to include relevant data in the DEM by means of kriging interpolation.

Key words: digital elevation model, SRTM, DEM, level surface, elevation error.

#### Введение

Проектирование и эксплуатация горных предприятий никогда не обходятся без определения и учета гидрологических и гидрогеологических особенностей региона, поскольку ошибки, вызванные недостаточной полнотой и качеством исходных данных при моделировании, могут привести к катастрофическим последствиям. В настоящее время мероприятия по разведке и добыче полезных ископаемых в значительной степени связаны с месторождениями со сложными гидрогеологическими условиями [1].

Создание численных гидрологических и гидрогеологических моделей позволяет обосновывать инженерные решения при отработке месторождений полезных ископаемых и создании гидротехнических сооружений.

Для целей моделирования водосборов требуются данные о поверхности рельефа выполнении работ больших площадей. Зачастую при отсутствуют крупномасштабных топографических съемок, а выполнение съемки с нуля неоправданно дорого. Для решения данной проблемы используются цифровые модели рельефа (ЦМР). Такие модели получают методами дистанционного зондирования Земли (от съемок с беспилотных летательных аппаратов до спутниковой интерферометрии). Выбор ЦМР для моделирования крайне важен, поскольку именно от ее качества зависит корректность работы вычислительных алгоритмов [2]. Наличие большого числа ЦМР, полученных по результатам дистанционного зондирования Земли и доступных для использования, позволяет частично решить проблему с отсутствием «традиционной» картографической информации, однако требуется обязательная предварительная обработка таких данных.

#### Методы исследования

В современных геоинформационных системах трехмерное представление земной поверхности описывается с помощью цифровых моделей рельефа (Digital Elevation Models). Цифровая модель рельефа представляет собой файл геоданных, содержащий сведения о значении высот земной поверхности в заданной проекции, и может быть представлена в виде

растрового файла (GeoTIFF), нерегулярной триангуляционной сети (TIN), облака точек регулярной сетки (GRID) и т.д.

В качестве исходных данных для модели, полученной методом дистанционного зондирования Земли, были выбраны данные по результатам радиолокационной топографической миссии шаттла — SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Базовым этапом подготовки исходных данных для моделирования гидрогеологических процессов является коррекция ЦМР. В исходных данных SRTM практически всегда содержатся понижения рельефа, образующие бессточные области [3]. Часть из них не являются естественными водными объектами (озерами, прудами, болотами и т.д.), а представляют собой артефакты, возникшие из-за радиолокационных теней и в силу особенностей устройства измерительных приборов, используемых при дистанционном зондировании Земли.

За последние десятилетия было выработано достаточное количество подходов к решению проблемы заполнения понижений. Основными характеристиками таких методов являются скорость выполнения алгоритма и величина внесенных искажений в ЦМР. Существуют методы, основанные на последовательном искусственном повышении высотных отметок узлов ячеек до тех пор, пока не станет возможным сток из узла ячейки строго вниз по склону при соблюдении условия, что сток не вернется в исходную ячейку (не окажется замкнутым) [4].

В других случаях применяется размытие значений ЦМР (добавление шумов) при каждой итерации для уменьшения количества и размеров таких впадин, однако такие методы требуют больших затрат на время исполнения алгоритма и сложны в реализации без ущерба для релевантности исходной модели [5].

Наиболее известным и зарекомендовавшим себя в практике гидрологического моделирования является метод, предложенный L. Wang и H. Liu [6]. Данный метод качественно отличается от предыдущих благодаря способности одновременного определения «за один проход» как направления стока, так и пространственного положения водоразделов. Это становится возможным благодаря тому, что в нем используется алгоритм поиска потоков с наименьшими затратами (решение задачи оптимального пути в теории графов). Под наименьшими затратами в данном случае понимается получение множества выходов на границе ЦМР и нахождение оптимального пути от каждой внутренней ячейки модели, при котором результирующая высота этой ячейки будет минимальна, что позволяет минимизировать вмешательство в исходные данные. Данный алгоритм был использован при обработке исходных данных объекта исследования.

В качестве объекта исследования был выбран горнорудный район Предуралья (в р-не г. Губаха, Пермский край), характеризующийся сильно расчлененным рельефом (рис. 1, *a*).

Для построения ЦМР по результатам дистанционного зондирования был получен тайл (с англ. tile – плитка, один из видов представления картографической информации в ГИС-системах в виде растрового файла) SRTM-модели 4-й версии в формате GeoTIFF, предоставленный консорциумом пространственной информации (CGIAR-CSI). Отличительной особенностью данной версии SRTM является постобработка исходной SRTM-модели NASA первой версии заполнением данными дополнительных интерферометрических съемок «пустых зон», возникающих над водоемами и в районах со снежным покровом вследствие различной отражающей способности сигнала поверхностей. Исходный тайл имеет размеры 5х5 градусов, шаг сетки 3 угловые секунды (около 90 м).

Для преобразования пространственного положения точек из геодезических координат (геоцентрическая система координат WGS-84) в плоские прямоугольные координаты проекции Меркатора (UTM, Зона N40) была использована геоинформационная система QGIS. На следующем этапе из растрового файла были извлечены значения координат и высот с помощью модуля «gdal2xyz» QGIS, которые затем были преобразованы в формат текстового файла с разделителями (csv – comma separated values).

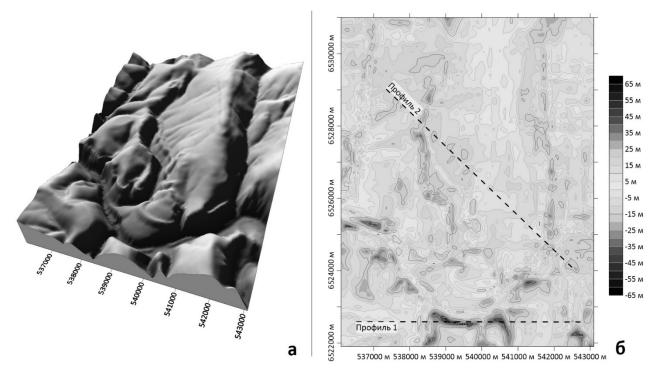


Рис. 1. Модель Косьвинской синклинали Кизеловского угольного бассейна. a — ЦМР объекта исследования;  $\delta$  — поверхность разности двух ЦМР, полученных по результатам векторизации и из данных SRTM [6].

Исходными топографическими материалами являлся планшет топоплана масштаба 1:25000 с сечением рельефа через 1 м. Было осуществлено трансформирование растровых материалов методом аффинного преобразования, их пространственная привязка в прямоугольной системе координат (UTM, Зона N 40) с использованием программных продуктов Credo Transform и MapInfo. Векторизация растровых материалов выполнена вручную с использованием программного продукта QGIS в соответствии с условными знаками рельефа. Для задания постоянной высоты зеркала водоемов использовались структурные линии. Данные о высотных отметках уреза воды рек приведены по среднему меженному уровню.

#### Результаты исследования

На основе подготовленных ранее поверхностей была построена результирующая поверхность посредством вычитания одной поверхности из другой (рис. 1,  $\delta$ ), позволяющая наглядно определить участки наибольшей разности высот между двумя поверхностями. При этом в пойменных зонах и районах с резким изменением высотных отметок исследуемой области разница высотных отметок между поверхностями достигла 50–65 м.

Наличие столь большой ошибки может быть вызвано сочетанием разных факторов: различием планового положения (смещения) характерных точек рельефа вследствие особенностей работы интерферометра и приемника сигнала, угла наклона измерительных приборов, под которым проводилось определение высоты; наличием радиолокационных теней (естественных и искусственных преград); различной отражающей способностью водной поверхности, а также преобладанием древесной растительности вблизи водоемов.

Для анализа участков с наибольшей разницей в значениях высотных отметок, а также других типичных форм рельефа (рис. 1,  $\delta$ ) были построены продольные профили (рис. 2). Профиль 1 наглядно показывает величину ошибки высоты SRTM-данных в пойменной части р. Косьва. Данный участок характеризуется резким изменением высотных отметок и наличием густой растительности. При этом противоположный пример плавного изменения высотных отметок представлен на профиле 2. В данном случае ошибка взаимного положения высотных отметок двух исходных поверхностей становится минимальной, а контур поверхности повторяет очертание рельефа.

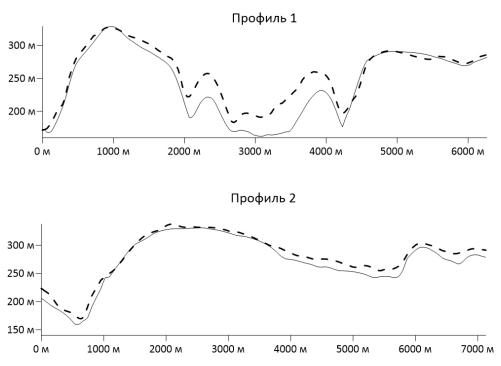


Рис. 2. Продольные профили поверхностей, полученных по результатам векторизации и из данных SRTM. Пунктирная линия — SRTM поверхность; сплошная линия — поверхность, полученная с топопланшетов.

Результирующая ЦМР была использована при создании геофильтрационной модели Косвьвинской синклинали в пределах Кизеловского угольного бассейна (КУБа) [7]. На уточненной модели была выполнена оценка балансовых составляющих для разных этапов развития территории: естественные ненарушенные условия, отработка с шахтным водоотливом, текущая ситуация с изливами шахтных вод, реализация инженерных мероприятий.

#### Заключение

ЦМР позволяют получать информацию о поверхности Земли на большой территории, что способствует внедрению гидрологического и гидрогеологического моделирования на всех этапах (до строительства, во время эксплуатации, на этапах консервации и рекультивации). Широкий спектр доступных моделей дает возможность представить точную модель рельефа при наличии соответствующего уровня квалификации исполнителя.

Сравнительный анализ исходных данных, полученных методом дистанционного зондирования и векторизацией топопланшетов, обнаруживает несовершенство SRTM-модели. Данная модель наиболее уязвима к быстрому изменению высотных отметок, а также наличию древесной растительности. Для сложных форм рельефа такие модели не подходят при работах, связанных с вычислением площадей и объемов поверхностей без дополнительной обработки.

При использовании SRTM-данных необходима оцифровка прибрежной полосы и участков с крутыми склонами с топографических карт и планов либо включение данных полевых измерений. Для создания конечной карты эффективно использование статистических интерполяторов, таких, как интерполяция методом кригинга с подбором теоретических параметров вариограммы на этапе вариограммного анализа [8]. Использование линейных интерполяторов приведет к появлению большого числа артефактов в ЦМР (резкие пики и впадины на участках, содержащих данные о высотных отметках из разных источников), поэтому их применение в данном случае существенно ограничено.

Использованная методика создания ЦМР позволила уточнить геофильтрационную модель Косьвинской синклинали Кизеловского угольного бассейна. На уточненной модели определено, что ресурсы угленосных пластов обеспечивали не более 50 % шахтного

дренажного стока. При моделировании было учтено взаимодействие угольного водоносного горизонта с вышележащим (визейско-артинским) и нижележащим (франско-турнейским) водоносными горизонтами. Установлена четкая зависимость расхода шахтных изливов от сезонности и климатических факторов. За счет расхода поверхностного стока образуется до 50 % расхода изливов.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН по теме N 0328-2019-0005.

#### Список литературы

- 1. Rybnikova Liudmila S., Rybnikov Petr A. Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia) // Mine Water and the Environment. 2020. https://doi.org/10.1007/s10230-020-00691-w
- 2. Sefercik U.G., Gokmen U. Country-scale discontinuity analysis of AW3D30 and SRTM Global DEMS: case study in Turkey // Arabian Journal of Geosciences. 2019. V. 12. 11 p.
- 3. Zhu D., Ren Q., Xuan Y., Chen Y., Cluckie I.D. An effective depression filling algorithm for DEM-based 2-D surface flow modelling // Hydrology and Earth System Sciences. 2013. V. 17(2). P. 495–505.
- 4. Garbrecht J., Martz L. W. Digital elevation model issues in water resources modeling // Hydrologic and hydraulic modeling support with geographic information systems. 2000. P. 1–28.
- 5. Planchon O., Darboux F. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models // Catena. 2002. V. 46(2). P. 159–176.
- 6. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // International Journal of Geographical Information Science. 2006. V. 20(2). P. 193–213.
- 7. Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., Максимович Н.Г., Деменев А.Д. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный Урал, Россия) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 1–3. С. 475–487. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487.
- 8. Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Опыт применения методов геостатистики для оценки загрязнения воздуха в районе промышленного предприятия (Средний Урал) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 11 (специальный выпуск 37). С. 596–605. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-37-596-605.

### ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИЕ АРОМАТИЧЕСКИЕ УГЛЕВОДОРОДЫ КАК МАРКЕР ПРОЦЕССОВ В ПОДЗЕМНОЙ ГИДРОСФЕРЕ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-439-443

Хаустов А.П., Редина М.М.

Российский университет дружбы народов, Москва, khaustov-ap@rudn.ru

**Аннотация.** Представлены возможности идентификации полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в подземной гидросфере с целью характеристики природных и техногенных процессов загрязнения. Показаны основные направления отечественных и зарубежных исследований и возникающие при этом проблемы. Демонстрируются практические примеры использования ПАУ как геохимических маркеров. Выделены основные проблемы анализа и нормирования ПАУ в подземных водах.

**Ключевые слова:** подземная гидросфера, подземные воды, ПАУ, техногенез.

**Abstract:** Possibilities of identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the underground hydrosphere in order to characterize natural and technogenic pollution processes are presented. The main directions of Russian and foreign research and the problems arising from this are shown. Practical examples of the use of PAHs as geochemical markers are demonstrated. The main problems of analysis and standardization of PAHs in groundwater are highlighted.

Keywords: underground hydrosphere, groundwater, PAHs, technogenesis.

Зарубежные исследования присутствия полициклических ароматических углеводородов (полиаренов, ПАУ) в подземных водах имеют более чем 40-летнюю историю. Наиболее ранние работы по этой тематике для загрязненных промышленных районов в поисковой системе Google Scholar относятся к концу 70-х гг. XX в. [1]. Причем это уже результат систематизированных исследований, с четко поставленными задачами и оценкой динамики загрязнения подземной гидросферы. В России можно отметить единичные исследования по этой тематике; впервые данные о ПАУ в пресных подземных водах с методикой анализа изложены в работе [2]. Был сделан важный вывод: слабая защищенность водоносных горизонтов в подземных водах региона до глубин 230 м обусловила высокие концентрации загрязняющих токсичных веществ: ПАУ (до 18 мкг/дм<sup>3</sup>), фенолов (до 29), парафинов (до 48). Кроме этого, в одной из скважин томского водозабора были зафиксированы 18-кратные превышения нормативов по бенз(а)пирену. В монографии Ю.И. Пиковского [3] и в его более ранних работах по кальдере Узон и другим месторождениям подчеркивались высокие индикационные свойства ПАУ в гидротермальных процессах.

Наибольшее внимание в зарубежных публикациях уделяется вопросам:

- оценки общего уровня подземных вод загрязнением ПАУ и его динамики в связи с сезонностью инфильтрации, либо по мере удаления от источника;
- создания многосредовых моделей взаимодействия подземных вод, транспорта, накопления и (реже) трансформации ПАУ;
- моделирования загрязнений подземной гидросферы ПАУ в специфических условиях: для карстовых пород и курортных зон (с учетом перспектив использования вод), при разливах нефтепродуктов, пожаров, последствия «исторических» загрязнений и др.;
- идентификации ведущих источников загрязнения ПАУ в общем потоке поллютантов;
- идентификации процессов накопления ПАУ в подземных водах и в контактирующих породах и факторов деградации (адсорбция, бактериальное разложение, фотолиз и др.);
- оценки рисков для здоровья при загрязнении подземных вод ПАУ;
- технологий очистки вод (фотодеградация, включая УФ-облучение; создание искусственных барьеров, в том числе биобарьеров);
- технологий и методов экологического (гидрогеоэкологического) мониторинга.

ПАУ представляют собой группу стойких органических загрязнителей, построенных из бензольных колец, с канцерогенными и мутагенными свойствами. На сегодня существует несколько перечней ПАУ, контролируемых в окружающей среде: в ЕС это четыре

обязательных соединения<sup>2</sup>; в перечень US EPA включены 16 веществ<sup>3</sup>. Нормативы содержания ПАУ для питьевых вод и поверхностных водных объектов в странах мира весьма различны. В некоторых работах вводится «максимально допустимый предел» в 10 мкг/дм<sup>3</sup>, рекомендованный для обеспечения безопасности грунтовых вод, что чрезвычайно много и не обосновано. Скорее всего, это типичные ошибки авторов статей, плохо представляющих процессы растворения ПАУ в водах (загрязнения). US EPA для суммы 16 ПАУ в питьевых водах установлена норма 200 нг/дм<sup>3</sup>. Директива ЕС определяет норму 100 нг/дм<sup>3</sup> для суммы четыре ПАУ, причем отдельно нормируется ВаР (10 нг/дм<sup>3</sup>). Он наиболее токсичен, по сравнению с ним рассчитываются коэффициенты токсичности других ПАУ. В России нормируются лишь концентрации в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования Naph (10 мкг/дм<sup>3</sup>) и ВаР (10 нг/дм<sup>3</sup>). Для расфасованных питьевых вод установлен норматив ВаР 5 нг/дм<sup>3</sup> (1 категория) и 1 нг/дм<sup>3</sup> (высшая).

Химический анализ ПАУ в водах – наиболее существенная проблема, связанная с низкой эффективностью их экстракции из водных растворов. Крайне малые концентрации и сложности определения ПАУ в воде порождают большие погрешности в зависимости от методов анализа. Это существенно сдерживает широкое применение ПАУ как индикаторов в гидрогеологии. Оптимален прикладных задачах анализ c использованием высокоэффективной хроматографии и масс-спектрометрии. Подчеркнем, что в связи с малыми концентрациями на уровне нг/дм<sup>3</sup> наибольшие ошибки (до 80–90 %) возникают при пробоотборе, хранении и экстракции проб; только 10 % – при измерении сигнала, поэтому пробоотбор должен проводиться согласно регламенту в темное стекло с фиксацией гексаном или кислотой, с предпочтительно твердофазной экстракцией на специальные «патроны». В настоящее время для атмосферных осадков и поверхностных вод действует «Методика измерений методом высокоэффективной жидкостной хроматографии РД 52.44.590-2016». Формально эта методика не применима к подземным водам: ее область применения – лишь атмосферные осадки и поверхностные воды, но результаты точнее, чем ПНДФ-14.1:2:4.70-96 (область применения включает и подземные воды). В новом РД значительно больше внимания уделено методам экстракции ПАУ в связи с вышеупомянутыми проблемами. Наши эксперименты на образцах вод различного состава показали низкую активность извлечения ПАУ по методике ПНДФ-14.1:2:4.70-96 и предпочтительность твердофазной экстракции из растворов. Точность анализа ПАУ в средах приобретает особенное значение при оценке коэффициентов перехода в системе «вода – породы – органическое вещество» [4].

Нами был также проведен специальный эксперимент с различными типами вод; установлено, что при пробоотборе в темные новые ПЭТ-упаковки происходит активное выщелачивание из этого материала значительных количеств большинства ПАУ за счет агрессивности вод [5], поэтому широко распространенная практика бутилирования и хранения питьевых вод в России (тем более минеральных и детских) в ПЭТ-тару далеко не безупречна. В большинстве стран ЕС существуют регламенты на розлив питьевых вод только в стеклянные упаковки.

Миграция ПАУ, как и многих других углеводородов, в гидросфере и сопредельных контактирующих средах имеет свою специфику и отражена нами в работе [6]. Максимальная из определенных концентраций суммы ПАУ в подземных водах, представленных в литературе, составляет 3.0 мг/л [7] (из которых 2.8 приходится на нафталин благодаря его высокой растворимости), близкие результаты указаны в работе [8].

Глубина распространения ПАУ с поверхности земли зависит от многих факторов и условий. Прежде всего, это наличие почвенного покрова. Гуминовые и фульвокислоты в почвах в значительной мере связывают или, наоборот, генерируют ПАУ в зависимости от

 $^{2}$ Бенз(а)пирен (BaP), бенз(b)флуорантен (BbFlu), бенз(к)флуорантен (BkFlu) и индено(1,2,3-cd)пирен (IP).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Нафталин (Naph), аценафтен (Ace), аценафтилен (Acn), флуорен (Fluo), антранцен (An), фененатрен (Phen), флуорантен (Flu), пирен (Py), хризен (Chr), бенз(а)антрацен (BaA), бенз(а)пирен (BaP), бенз(b)флуорантен (BbFlu), бенз(k)флуорантен (BkFlu), дибенз(a,h)антрацен (DbA), IP, бенз(g,h,i)перилен (Bghi)

геохимической обстановки. ПАУ липофильны и четко реагируют как на механический состав минеральной матрицы, так и на наличие органических веществ (особенно растворенных), способных сорбировать ПАУ, благодаря особенностям их молекулярного строения. Эти процессы хорошо прослеживаются в вертикальном разрезе для верхних слоев зоны аэрации. В первую очередь из растворов сорбируются и разлагаются за счет фотолиза 2 —3-кольцевые ПАУ. Иными словами, кинетика разложения ПАУ обратно пропорциональна молекулярной массе. Прогнозы распространения нефтепродуктов от техногенного источника на основе концентраций в загрязненных грунтах бензола, толуола и Ру для 6-метровой слабопроницаемой зоны аэрации (с поверхности изолирована грунтами со строительным мусором и глинами, далее по разрезу сложена супесями и суглинками) указывают на принципиальную возможность их попадания в грунтовые воды в течение 100 лет [9].

По данным [10] содержание  $\Sigma$ 16 ПАУ в грунтах в крупном индустриальном районе на глубинах 30, 100, 200, 300 и 400 см составляло в среднем 1.70; 0.40; 0.28; 0.20 и 0.26 мг/кг соответственно. Эквивалентное содержание  $\Sigma$ 16 РАН в подземных водах варьировалось от 0,23 до 4.50 мг/м³ (230–4500 нг/дм³) при среднем значении 1420 нг/дм³. Все концентрации ПАУ для почвенного разреза и грунтов закономерно снижались с глубиной. Факторный анализ указал на три источника загрязнения: пирогенный (52.4 % общей дисперсии), петрогенный (26.1 %) и биомассу (8.5 %). Отмечен высокий экологический риск в связи с концентрациями как  $\Sigma$ 16 ПАУ, так и отдельных ПАУ, который уменьшается с глубиной. Пример наглядно иллюстрирует возможности оценки сорбции органических загрязнителей при инфильтрации подземных вод в гетерогенных средах.

В последнее время актуализировалась проблема изменения качества подземных вод вследствие лесных пожаров. Эти кумулятивные воздействия — результат пирогенной мобилизации поллютантов при горении биоты, химических веществ, используемых для тушения, и послепожарных мер. Для гидрогеологии России это новая проблема, и ей практически не уделено внимание. В зарубежных исследованиях [11] для горных районов Португалии доказано, что микроэлементы, поступающие в гидросферу после пожара, как и ПАУ, создают пирогенные комплексы соединений, токсичные для биоты и человека. В пробах подземных вод на участках пожаров были обнаружены 15 из 16 определяемых ПАУ в концентрациях значительно выше, чем в контрольных регионах. Это прямо указывает на пирогенное загрязнение водоносных горизонтов. Общая сумма ПАУ в районах пожаров колебалась от 23.1 до 95.1 нг/дм³ (среднее 62.9 нг /дм³), что в 1–6 раз выше среднего уровня в контрольном районе (16.2 нг/дм³). Важно то, что в контрольных образцах уровни легких ПАУ с 2–4 кольцами были выше, чем тяжелых 5- и 6-кольцевых, по сравнению с подземными водами районов пожаров. Этот эффект дает возможность оценок зон влияния не только пожаров, но и других рассредоточенных загрязнителей подземных вод.

Так, для подземных вод сельских районов Восточного Китая проведена оценка пространственного распределения источников ПАУ и оценка риска канцерогенных заболеваний населения [12]. Отмечено резкое увеличение уровня загрязнения из-за сжигания ископаемого топлива. Суммарные концентрации 16 приоритетных ПАУ варьировались от 4 до 169 нг/дм³, а среднее арифметическое –  $38\pm25$  нг/дм³. Самое высокое содержание ПАУ было обнаружено в колодезной воде из провинции Шаньдун, а средняя концентрация составила  $60\pm48$  нг/дм³. Оценки канцерогенных рисков показали отсутствие опасности в связи с наличием 9 неканцерогенных ПАУ. Для канцерогенных же ПАУ значения риска по дермальному показателю были выше  $10^6$ , а для ВаР и DbA – еще выше (>  $10^4$ ), что указывает на значительные риски для детей и взрослых.

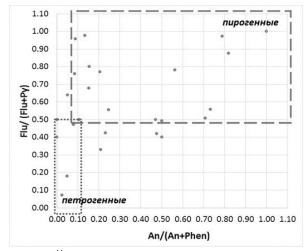
Для оценки вертикальной миграции из почв в подземные воды и рисков загрязнения исследовано вертикальное распределение и сезонные колебания 16 ПАУ в почвах и воде четырех эпикарстовых водосборов на юго-западе Китая [13]. Суммарная концентрация ПАУ колебалась в пределах 61–3285 нг/г в почвах и 341–4969 нг/дм<sup>3</sup> в родниковой воде. Вертикальное распределение ПАУ в почвах варьировалось в зависимости от количества бензольных колец и высоты водосбора. Концентрации ПАУ линейно связаны с общим

содержанием органического углерода на разных глубинах в водосборах на высоте 563–783 м над уровнем моря. Однако такая корреляция не наблюдалась в водосборе на больших высотах (2090 м), поскольку больший поток влаги приводил к быстрой миграции 2–3-кольцевых ПАУ в почвах. Показано, что грунтовые воды сильно загрязнены ПАУ в карстовых районах; срочно требуется их эффективная защита. Выявлена корреляция вертикального распределения ПАУ с токсичными органическими соединениями в почвах на малых высотах. Почвы карстовых районов и породы показали низкую способность к сорбции многокольцевых ПАУ (более трех) по сравнению с другими почвами.

Индикаторные соотношения ПАУ позволяют с достаточной долей вероятности определить характер их источника загрязнения. Традиционно используют соотношения концентраций либо «кинетических» и «термодинамических» изомеров ПАУ с одинаковой молекулярной массой. Применяются также соотношения сумм концентраций «легких» ПАУ к высокомолекулярным (многокольцевым), иногда доли концентрации ПАУ, которые характеризуют специфические техногенные процессы (определенные типы производства). Для соотношений известны границы между пиро- и петрогенными процессами; значения, соответствующие конкретным технологиям, либо техногенным источникам (транспорт на дизтопливе, производство алюминия...), удаленность от источника загрязнения, возраст загрязнения. Наиболее распространены соотношения, основанные на концентрациях:

- Flu и Ру: Flu/ (Flu+Ру) с границей между пиро- и петрогенными 0.1 и
- An иPhen: An/ (An+Phen) с границей 0.5.

Покажем применение этого подхода к анализу загрязнения подземных вод по данным о природных источниках (грязевой вулкан, пресный источник, рапа соленого озера на Крымском п-ове); об анализах подземных вод под свалками гудрона в ФРГ [14], в промышленном центре в Боснии [10], в мегаполисе в Индии [15], в сельских районах Индии [16] и КНР [12], в зоне лесных пожаров в Португалии [11], на газовом заводе в США [1]; в источниках выхода нефтесодержащих вод («гидротермальная нефть») в Калифорнийском заливе США [17]. Рисунок иллюстрирует распределение проб в плоскости индикаторных соотношений с выделением явно пирогенной (высокотемпературные процессы образования загрязнений) и петрогенной (низкотемпературные процессы) области.



Оценка генезиса загрязнений подземных вод на основе индикаторных соотношений.

Часть проб можно закономерно отнести к пирогенным (загрязнения вследствие пожаров, размещения отходов на городских свалках, хранилища промышленных отходов). Другие пробы содержат петрогенные ПАУ («гидротермальные нефти», загрязнения в индустриальном районе Боснии, природные источники Керченского п-ова). Для точек за пределами выделенных зон необходим дополнительный анализ, в том числе применение других индикаторных соотношений, которые более четко укажут на характер источника.

Таким образом, ПАУ – эффективные индикаторы природных и техногенных

процессов в подземной гидросфере, однако такие исследования в отечественной практике редки. Одна из причин — сложность аналитических определений. Во многих гидрогеологических публикациях не уделяется внимание технике пробоотбора, хранения и экстракции ПАУ из водных растворов, а также ошибкам анализа. Недоучет липофильности и сорбционных свойств ПАУ может привести к серьезным ошибкам при расчетах и моделировании вертикальных и горизонтальных потоков влаги. По сравнению с другими средами, поведение ПАУ в растворах (а в подземной гидросфере тем более) во многом обусловлено их внутренними физико-химическими свойствами и способностью к фотолитическому и микробиологическому окислению.

С учетом физико-химических процессов поведения ПАУ в системе «вода – породы – органическое вещество» большинство количественных оценок и моделей на их основе требует ревизии, особенно при идентификации источников загрязнения.

#### Список литературы

- 1. Mattox C F., Humenick M.J. Organic groundwater contaminants from UCG // Proceedings of the 5th Underground Coal Conversion Symposium, Alexandria, Virginia, 1979.
- 2. Туров Ю.П., Кадычагов П.Б., Гузняева М.Ю., Альшанский А.М. Полициклические ароматические углеводороды в подземных водах и почвах Обь-Томского междуречья // Химия в интересах устойчивого развития. 1999. № 7. С. 291.
- 3. Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. М.: Изд-во МГУ, 1993. 208 с.
- 4. Хаустов А.П., Редина М.М., Яковлева Е.В. Водопроявления подземных вод как геохимические системообразующие объекты (интерпретация на основе распределения ПАУ) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2018. № 3. С. 3–17.
- 5. Khaustov A., Redina M., Goryainov S. Migration of PAHs and Phthalates from Package Materials during Water Storage: Glass or Plastic? // Polycyclic Aromatic Compounds. [Электронный ресурс]. URL:https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10406638.2020.1734033. P. 1–13. дата обращения: 04.03.2020.
- 6. Хаустов А.П., Редина М.М. Парадоксы концентрирования углеводородов в компонентах геосистем (на примере ПАУ) // Сергеевские чтения: геоэкологические аспекты реализации национального проекта «Экология». Диалог поколений. Вып. 22: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24 марта 2020 г.). М.: РУДН, 2020. С. 94–103
- 7. Richard D.E., Dwyer D.F. Aerated biofiltration for simultaneous removal of iron and polycyclic aromatic hydrocarbons from groundwater // Water environment research. 2001. T. 73, № 6. C. 673–683.
- 8. Groher D. An investigation of factors affecting the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater at coal tar waste sites. M.S. Thesis of Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- 9. Галицкая И.В., Позднякова И.А. К проблеме загрязнения подземных вод и пород зоны аэрации нефтепродуктами и ПАУ на городских территориях // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2011. № 4. С. 337–343.
- 10. Ilić P., Markić D.N., Bjelić L.S. Evaluation of Sources and Ecological Risk of PAHs in Different Layers of Soil and Groundwater. 2020. DOI:10.20944/preprints202002.0224.v1.
- 11. Mansilha C., Carvalho A., Guimarães P., Espinha Marques J. Water quality concerns due to forest fires: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) contamination of groundwater from mountain areas // Journal of Toxicology and Environmental Health. 2014. Part A, 77(14-16). P. 806–815.
- 12. Liang M., Liang H., Rao Z., Xu D. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater from rural areas in eastern China: Spatial distribution, source apportionment and health cancer risk assessment // Chemosphere. 2020. 259. 127534.
- 13. Sun Y., Zhang S., Lan J. et al. Vertical migration from surface soils to groundwater and source appointment of polycyclic aromatic hydrocarbons in epikarst spring systems, southwest China // Chemosphere. 2019. 230. P. 616–627.
- 14. Schlanges I., Meye, D., Palm W.U. et al. Identification, quantification and distribution of PAC-metabolites, heterocyclic PAC and substituted PAC in groundwater samples of tar-contaminated sites from Germany // Polycyclic Aromatic Compounds. 2008. T. 28, №. 4–5. C. 320–338.
- 15. Masih A., Lal J. K. Concentrations and carcinogenic profiles of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater of an urban site at a terai belt of North India // International Journal of Applied Engineering Research. 2014. 9(1). P. 1–8.
- 16. Masih A., Saini R., Taneja A. Contamination and exposure profiles of priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in groundwater in a semi-arid region in India // International Journal of Water. 2008. T. 4, № 1–2. C. 136–147.
- 17. Kawka O.E.M. Hydrothermal alteration of sedimentary organic matter in Guaymas Basin, Gulf of California. Ph.D. thesis, Oregon State University, Corvallis (1990). 1990. P. 229.

# ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БЕЛОКУРИХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РАДОНОВЫХ ВОД

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-444-448

Хващевская А.А. $^1$ , Копылова Ю.Г. $^1$ , Новиков Д.А. $^2$ , Пыряев А.Н. $^3$ , Максимова А.А. $^2$ , Деркачев А.С. $^2$ , Редин А.А. $^4$ 

<sup>1</sup>Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, unpc\_voda@mail.ru

<sup>2</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, NovikovDA@ipgg.sbras.ru

<sup>3</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск <sup>4</sup>АО «Курорт Белокуриха», Белокуриха, anatoliy-redin@yandex.ru

Аннотация. В работе представлены первые данные комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований азотно-кремнистых слаборадоновых термальных вод Белокурихинского месторождения. Воды имеют  $HCO_3$ - $SO_4$  Na и  $SO_4$ - $HCO_3$  Na состав с величиной общей минерализации от 198 до 257 мг/дм³, характеризуются щелочными рН 8.6–9.6, содержанием кремния от 19.8 до 24.6 мг/дм³ и относятся к трещинножильным водам гранитов верхнего палеозоя. Активность  $^{222}$ Rn составляет до 359 Бк/дм³. Значения  $\delta D$  (от -126.9 до -102.7 %) и  $\delta^{18}O$  (от -17.5 до -14.2 %) изученных вод указывают на их метеорное происхождение. Значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  варьируются от -9.7 до -25.6 % и указывают на биогенное происхождение углерода.

**Ключевые слова**: радоновые воды, стабильные изотопы кислорода, водорода, углерода, Белокурихинское месторождение минеральных радоновых вод, Алтае-Саянская складчатая область.

**Abstract.** The first data obtained in the integrated isotope-hydrogeochemical studies of nitrogen-siliceous low-radon thermal waters from the Belokurikha occurrence are presented. Water composition is HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> Na and SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na, with TDS from 198 to 257 mg/L, alkaline pH 8.6 – 9.6, silicon content from 19.8 to 24.6 mg/L; these are fracture-vein waters of the Upper Paleozoic granites. The activity of  $^{222}$ Rn is up to 359 Bq/L. The values of  $\delta$ D (from  $^{-126.9}$  to  $^{-102.7}$  %) and  $\delta$ <sup>18</sup>O (from  $^{-17.5}$  to  $^{-14.2}$  %) in the studied waters point to their meteoric origin. The values of  $\delta$ <sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> vary from  $^{-9.7}$  to  $^{-25.6}$  % and point to the biogenic origin of carbon.

**Key words:** radon waters, oxygen, hydrogen and carbon stable isotopes, Belokurikhinskoe mineral radon waters deposit, Altai-Sayan folded zone.

Радоновые воды на территории Сибири пользуются большим распространением благодаря особенностям геологического строения и широким проявлением процессов кислого магматизма. Открыто более 25 месторождений и проявлений (Тулинское, Заельцовское, Шивелигское, Белокурихинское, Шумак, Чойган и другие) [1–9].

Белокурихинское месторождение термальных азотно-кремнистых слаборадоновых вод расположено в западной части Алтае-Саянской складчатой области, в долине р. Белокуриха. Первые скважины глубиной до 140 м были пробурены в ходе детальных поисково-разведочных работ, проводившихся под руководством профессора М.И. Кучина в период с 1931 по 1938 г. Большой вклад в изучение гидрогеологических условий месторождения внесли Н.М. Елманова, А.А. Логинов, А.А. Редин и др. Эксплуатация ведется с 1949 г. по настоящее время. Утвержденные в 1996 г. эксплуатационные запасы термальных радоновых вод по категориям А+В составили 900 м³/сут, однако экспериментальным путем установлено, что оптимальная величина суммарного водоотбора из эксплуатационных скважин не должна превышать 674 м³/сут. Это позволит сохранить стабильность химического состава подземных вод, включая бальнеологические показатели. В настоящее время на месторождении эксплуатируются скважины № 3э, 3д и 4э, в резерве № 4д, 1э, 5э, 10э и три наблюдательные – 3гр, 4гр, 10гр (рис. 1, *a*).

В марте 2020 г. в связи с выполнением работ по переоценке запасов подземных минеральных термальных радоновых вод на Белокурихинском месторождении было отобрано 15 проб из эксплуатационных и наблюдательных скважин, одного колодца, двух источников и р. Белокуриха. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Исследование изотопного состава

кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты проводилось в Аналитическом центре МИИ Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

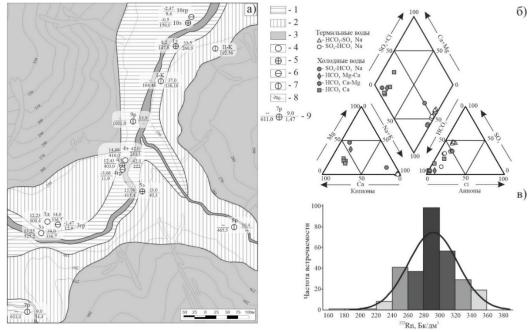


Рис. 1. Гидрогеологическая схема Белокурихинского месторождения (a). Зоны распространения: I — аллювиальных вод, 2 — холодных трещинных вод гранитов, 3 — термальных трещинных вод гранитов; скважины: 4 — эксплуатационные, 5 — резервные (наблюдательные), 6 — наблюдательные (на грунтовые воды), 7 — разведочные; 8 — изогипсы, м; 9 — дробь слева: числитель — напор над поверхностью, м (май 2020 г.), знаменатель — глубина скважины, м, дробь справа: числитель — температура,  ${}^{\circ}$ С, знаменатель — активность радона,  ${}^{\circ}$ Бк/дм ${}^{3}$ ; диаграмма Пайпера состава природных воды Белокурихинского месторождения ( $\delta$ ); распределение радона в водах эксплуатационной скважины 3д ( $\epsilon$ ).

Особенности гидрогеологических условий месторождения определяются весьма сложным геологическим строением изучаемой территории, которая находится в зоне сочленения Западно-Сибирской плиты и горных сооружений Алтая. Переход между ними маркируется тектонической зоной, которая в рельефе выражена резким уступом и контролируется крупным Белокурихинским разломом субширотного структурно простирания. Он оперяется более мелкими дизъюнктивными нарушениями, определяющими блоковую структуру месторождения и анизотропию фильтрационно-емкостных свойств [10]. гидрогеологическом разрезе Белокурихинского месторождения выделено гидравлически взаимосвязанных водоносных горизонта. Первый безнапорный водоносный горизонт объединяет рыхлые отложения четвертичного возраста мощностью от 2.5 до 30.0 м, представленные аллювием, в основном гравийно-галечниковыми и песчано-глинистыми отложениями, редко с щебнем и галькой. Второй напорный водоносный горизонт включает граниты верхнепалеозойского возраста от серых до кирпично-красных (в зонах гидротермальных изменений), различной степени трещиноватости: от монолитных до выветрелых. Максимальная глубина бурения (скв. 9р) достигает 1000 м. Напорные воды разгружаются в четвертичных отложениях и дренируются р. Белокуриха.

Рассмотрим подробнее особенности геохимии изученных вод, разделенных на однородные геохимические совокупности с помощью коэффициентов (Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, Ca/Na, Ca/Mg, rNa/rCl и SO4/Cl). Отношения Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si использованы для оценки особенностей обогащения вод за счет процессов гидролиза алюмосиликатов и конгруэнтного растворения карбонатов;  $SO_4^{2-}/Cl^->>1$  и  $rNa^+/rCl^->>1$  – гидролиза алюмосиликатов и окисления сульфидных минералов; пропорциональное увеличение значений  $SO_4^{2-}/Cl^-=1$ ,  $rNa^+/rCl^->1$ , Ca/Na>0 – испарительного концентрирования.

Группа трещинно-жильных вод гранитов объединяет несколько разновидностей: термальные (+ 32.4...+ 42.6 °C); термальные и холодные ( $\approx$  + 13 °C), залегающие в выветрелых гранитах; холодные зоны смешения с грунтовыми водами. Средние значения геохимических коэффициентов для данной группы составляют: Ca/Si 0.14; Mg/Si 0.05; Na/Si 3.80; Si/Na 0.26; Ca/Na 0.04; Ca/Mg 6.74; rNa/rCl 12.93 и SO<sub>4</sub>/Cl 4.99, что свидетельствует о преобладающей роли процессов гидролиза алюмосиликатов при формировании их химического состава. В целом, термальные воды характеризуются HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> Na и SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na составом с величиной общей минерализации от 198 до 257 мг/дм<sup>3</sup>, шелочными рН 8.6–9.6 и содержанием кремния от 19.8 до 24.6 мг/дм<sup>3</sup>. Холодная разновидность отличается SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na составом и величиной общей минерализации 184–234 мг/дм<sup>3</sup>, широкой вариацией рН (6.9–9.1) и содержаниями Si от 17.1 до 21.9 мг/дм<sup>3</sup>. Содержания радионуклидов для данной группы составляют (мг/дм<sup>3</sup>):  $^{238}$ U от  $1.12 \cdot 10^{-6}$  до  $7.31 \cdot 10^{-3}$  и  $^{232}$ Th от  $1.77 \cdot 10^{-6}$  до  $9.79 \cdot 10^{-5}$ .  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в термальных водах варьируется в интервале от  $3.95 \cdot 10^{-3}$  до 9.28. В скв. 3Гр отмечаются процессы смешениях с грунтовыми водами, что проявляется в росте отношений Ca/Si 0.48; Mg/Si 0.25; Ca/Na 0.14; снижении Na/Si 3.38; Ca/Mg 1.92; rNa/rCl 7.45 и SO<sub>4</sub>/Cl 2.93. Сопоставимые значения характеризуют отношение Si/Na 0.30. В микрокомпонентном составе вод этой группы следует отметить высокие концентрации  $(M\Gamma/M^3)$ :  $Li_{0.64} > W_{0.37} > Mo_{0.041} > Hg_{0.0077} > As_{0.0055} > Ge_{0.0047} > Ga_{0.004} > Be_{0.00028} > Th_{0.000098}$ . Отмечаются признаки концентрирования в водах А1, У и РЗЭ.

Ко второй группе относятся две разновидности грунтовых вод: зоны редкоземельной минерализации (скв. 4Гр) и фонового состава. По сравнению с предыдущей группой возрастают средние значения геохимических коэффициентов у Ca/Na 3.16; Ca/Si 6.22; Mg/Si 1.25; Si/Na 0.51 и SO<sub>4</sub>/Cl 6.63. Такой рост, вероятно, обусловлен значительной долей карбонатной составляющей во вмещающих породах, что сопровождается закономерным снижением: Na/Si 1.98; Ca/Mg 5.13 и rNa/rCl 12.13. Воды отличает HCO<sub>3</sub> Ca состав с величиной общей минерализации от 252 до 392 мг/дм<sup>3</sup>, нейтральные и слабощелочные рH (7.3–8.1) и содержания Si от 7.9 до 10.5 мг/дм<sup>3</sup>. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм<sup>3</sup>):  $^{238}$ U от 4.18·10<sup>-3</sup> до 2.93·10<sup>-2</sup> и  $^{232}$ Th от 2.46·10<sup>-6</sup> до 8.57·10<sup>-4</sup>.  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в термальных водах варьируется в интервале от 2.94·10<sup>-4</sup> до 2.92·10<sup>-2</sup>. В водах скважины 4Гр отмечаются повышенные значения многих микрокомпонентов (мг/дм<sup>3</sup>): Fe<sub>20.7</sub> > P<sub>0.80</sub> > Mn<sub>0.165</sub> > Ti<sub>0.054</sub> > V<sub>0.030</sub> > U<sub>0.029</sub> > Zn<sub>0.027</sub> > Cu<sub>0.015</sub> > Cr<sub>0.010</sub> > As<sub>0.0044</sub> > Co<sub>0.0030</sub> > Se<sub>0.0014</sub> > Ga<sub>0.0012</sub> > Th<sub>0.00086</sub> > Zr<sub>0.00038</sub> > Be<sub>0.00018</sub> > Ge<sub>0.00018</sub> > Bi<sub>0.000046</sub>. Наряду с радиоактивными элементами следует отметить высокие содержания у Y до 0.0025 мг/дм<sup>3</sup> и P3Э, которые достигают у  $\Sigma$ LREE 0.026 и у  $\Sigma$ HREE 0.0021 мг/дм<sup>3</sup>.

К третьей разновидности относятся поверхностные воды р. Белокуриха, состав которой изменяется вниз по течению от  $HCO_3$  Ca-Mg до  $HCO_3$  Mg-Ca. Величина общей минерализации варьируется от 124 до 133 мг/дм³, pH от 7.5 до 7.6, а содержание Si меняется от 7.8 до 8.6 мг/дм³. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм³):  $^{238}$ U от  $8.33\cdot10^{-4}$  до  $1.81\cdot10^{-3}$  и  $^{232}$ Th от  $8.21\cdot10^{-5}$  до  $2.20\cdot10^{-4}$ .  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в термальных водах варьирует в интервале от  $4.54\cdot10^{-2}$  до  $2.64\cdot10^{-1}$ . Средние значения геохимических коэффициентов составляют: Ca/Si 1.89; Mg/Si 1.11; Na/Si 0.69; Si/Na 1.63; Ca/Na 2.93; Ca/Mg 1.71; rNa/rCl 5.45 и  $SO_4$ /Cl 3.70. В поверхностных водах наблюдаются сопоставимые концентрации Si, по сравнению с грунтовыми водами. Проба, отобранная в городе, несет все черты антропогенного загрязнения, что проявляется в росте содержаний Na и Cl. По существенному обогащению вод р. Белокуриха РЗЭ можно считать, что они также подвержены влиянию редкоземельной минерализации.

В настоящей работе впервые выполнен комплекс исследований изотопного состава водорода и кислорода вод, а также углерода в водорастворенной форме углерода (DIC – Dissolved inorganic carbon). Анализ полученных данных по изотопным отношениям кислорода и водорода изученных вод (рис. 2, a) показал, что все они имеют метеорное происхождение (значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  располагаются, в большинстве случаев, между глобальной (GMWL) и локальной (LMWL) линиями метеорных вод [11, 12]; локальная линия

метеорных вод приведена для ближайшей точки наблюдений из представленных в Wiser — для г. Иркутска). Несущественные положительные отклонения значений  $\delta^{18}$ O от LMWL, повидимому, обусловлены эффектом испарения вод до их инфильтрации [13, 14]. Для большинства подземных вод (рис. 2, a) характерно обогащение изотопных отношений кислорода и водорода легкими изотопами Н и  $^{16}$ O, приводящее к смещению величин  $\delta$ D и  $\delta^{18}$ O к более отрицательным значениям вдоль LMWL. Вероятно, это свидетельствует об инфильтрационном питании этих водоносных горизонтов водами со смещением акцента питания к зимнему периоду года (за счет активной эвапотранспирации летних осадков), поскольку проявление высотного эффекта — уменьшения концентрации дейтерия и  $^{18}$ O в атмосферных осадках по мере увеличения абсолютных отметок местности — в исследованной области представляется затруднительным (перепад высот не превышает 100 м) [15].

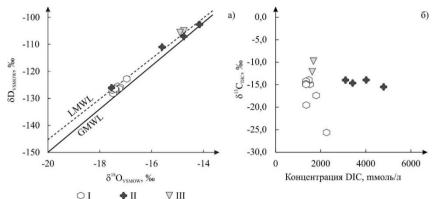


Рис. 2. a — значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  для природных вод Белокурихинского месторождения радоновых вод относительно GMWL и LMWL;  $\delta$  — содержание и изотопный состав углерода в DIC исследованных вод. I — трещинно-жильные воды гранитов; II — зона редкоземельной минерализации и фонового состава; III — поверхностные воды.

Значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  в исследованных водах варьируются в диапазоне от -9.7 до -12.1 % для поверхностных вод р. Белокуриха и от -13.9 до -25.6 % для подземных вод (рис. 2,  $\delta$ ). При этом содержание DIC по сумме трех компонентов ( $CO_{2aq}$ ,  $HCO_3^-$  и  $CO_3^{2-}$ ) составляет от 1300 до 4800 µмоль/л. Все полученные значения углеродных дельт и содержание DIC в водах указывают на явное участие биогенной почвенной углекислоты, производимой при распаде остатков растений с фотосинтезом типа  $C_3$ , в формировании DIC. Существенная разница изотопного состава углерода в DIC изученных вод, по-видимому, может быть обусловлена различным геохимическим типом вод и, соответственно, разницей в соотношении компонентов DIC. Переход почвенной углекислоты в каждую из указанных форм сопровождается изотопным фракционированием, существенно отличающимся величиной коэффициента  $\epsilon$  [16]. Наиболее отрицательным значениям  $\delta^{13}C_{DIC}$  соответствует подземная вода с наибольшей долей водорастворенного  $CO_{2aq}$  (более 50 % от общей суммы DIC), имеющего, в отличие от  $HCO_3^-$  и  $CO_3^{2-}$ , отрицательную величину  $\epsilon$ , что, по-видимому, и является первопричиной самого легкого изотопного состава водорастворенного углерода в указанной пробе.

Углекислота вод р. Белокуриха в значительной степени насыщается легким изотопом  $^{12}$ С после подпитки реки подземными водами (значения  $\delta^{13}$ С $_{DIC}$  становятся легче на 2.4 ‰) на фоне небольшого обогащения легкими изотопами водорода и кислорода самих вод (0.7 и 0.1 ‰, соответственно). Это может свидетельствовать как об участии поверхностного водосбора грунтовых вод в привнесении DIC в воды реки, так и указывать на то, что величина  $\delta^{13}$ С $_{DIC}$  является более чувствительным маркером смешения водных потоков в сравнении с  $\delta$ D и  $\delta^{18}$ O.

Таким образом, в настоящей работе представлены первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Белокурихинского месторождения термальных азотно-кремнистых слаборадоновых вод. Установлены особенности трех геохимических групп природных вод, которые подразделяются, в свою очередь, на семь разновидностей.

Термальные трещинно-жильные воды гранитоидов, которые эксплуатируются на месторождении с 1949 г., имеют HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> Na и SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> Na состав с величиной общей минерализации от 198 до 257 мг/дм<sup>3</sup>, характеризуются щелочными рН 8.6–9.6, содержанием кремния от 19.8 до 24.6 мг/дм<sup>3</sup>. Содержания радионуклидов составляют (мг/дм<sup>3</sup>):  $^{238}$ U от  $1.12 \cdot 10^{-6}$  до  $7.31 \cdot 10^{-3}$  и  $^{232}$ Th от  $1.77 \cdot 10^{-6}$  до  $9.42 \cdot 10^{-5}$ .  $^{232}$ Th/ $^{238}$ U отношение в термальных водах варьируется в интервале от  $3.95 \cdot 10^{-3}$  до 9.28, при среднем 2.92. Активность  $^{222}$ Rn в скважинах варьируется от 160 до 360 Бк/дм<sup>3</sup>, при среднем значении 290 Бк/дм<sup>3</sup>. Грунтовые и подвержены поверхностные волы влиянию редкоземельной радиоактивной минерализации. Предполагается инфильтрационное питание эксплуатируемых водоносных горизонтов Белокурихинского месторождения метеорными водами со смещением акцента питания к осадкам зимнего периода. Содержание DIC, а также значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  в исследованных водах указывают на его биогенное происхождение. Соотношение компонентов DIC оказывает существенное влияние на конечное значение  $\delta^{13}C_{DIC}$  каждой пробы. Для поверхностных вод р. Белокуриха наблюдается обогащение DIC легким изотопом углерода <sup>12</sup>С.

Исследования проводились при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540004 и Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

#### Список литературы

- 1. Посохов Е.В., Толстихин Н.И. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). Л.: Недра, 1977. 240 с.
- 2. Вериго Е.К., Быкова В.В., Гусев В.К. Заельцовское месторождение радоновых вод (Новосибирское Приобье) // Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. 1979. Вып. 14. С. 47–51.
- 3. Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Заельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 4. С. 1255–1274.
- 4. Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in Radon Waters of The Zaelsovsky field (The Southern Part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. International Conference on Applied Physics, Power and Material Science (Secunderabad, Telangana, India, 5-6 December 2018). 2019. V. 1172, № 1. Article 012096.
- 5. Корнеева Т.В., Новиков Д.А. Формы миграции химических элементов в радоновых водах месторождения "Горводолечебница" (г. Новосибирск) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН, 2020. № 17. С. 287–291.
- 6. Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Role of water-rock interactions in the formation of the composition of radon waters of the Zaeltsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V. 1451. Article 012007.
- 7. Елисеев В.А. Радоновые азотно-термальные воды Алтая // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры. 2010. № 5. С. 38–40.
- 8. Булатов А.А., Копылова Ю.Г., Джабарова Н.К., Рычкова К.М., Аракчаа К.Д., Хващевская А.А., Гусева Н.В., Пашагин А.В. Новые сведения о составе радоновых вод (Шивелигское месторождение) // Курортная база и природные лечебно-оздоровительные местности Тувы и сопредельных регионов. 2013. № 1. С. 154–161.
- 9. Минеева Л.А., Аракчаа К.Д., Кызыл О.М. Физико-химическая характеристика минеральных вод месторождений Шумак и Чойган // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2016. Т. 17. С. 115–134.
- 10. Дергунов А.Б. Структуры зоны сочленения Горного Алтая и Западного Саяна, М.: Наука, 1967. 217 с.
  - 11. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. V. 133. P. 1702–1703.
  - 12. https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx (дата обращения 20.01.2021).
- 13. Chafouq D., Mandour A.El, Elgettafi M., Himi M., Chouikri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) // Journal of African Earth Sciences, 2018. V. 139. P. 1–13.
- 14. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. 2020. V. 210. Article 106445.
  - 15. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир. 2009. 632 с.
- 16. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO<sub>2</sub> // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59. Issue 1. P. 107–114.

## VI. ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. СОСТОЯНИЕ И КОНТРОЛЬ

# ВОЗМОЖНЫЕ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ТЕРРИГЕННЫХ РЕЗЕРВУАРАХ ПОДЗЕМНОГО ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА С МЕТАНОМ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-449-453

Абукова Л.А., Абрамова О.П., Филиппова Д.С., Сафарова Е.А. *Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, abukova@ipng.ru* 

Аннотация. В аспекте совместного подземного хранения водорода с метаном анализируются проявления гидрохимических процессов, приводящих к нарушению свойств пород-покрышек и коллекторов в подземных резервуарах. В основе исследований – результаты экспериментальных работ по изучению влияния внешних термобарических нагрузок на глинистые породы и микробиологического анализа пластовых вод действующих подземных хранилищ газа. Рассмотрены изменения, происходящие с глинистыми породами под циклическими нагрузками при снижении влажности, уменьшении массы породообразующих компонентов, превышении порога насыщения карбонатными и сульфатными солями кальция. Установлены основные риски ухудшения свойств пород-покрышек и коллекторов, связанные с гидрохимическими как абиотическими, так и некоторыми микробиологическими реакциями между водородом, минеральными и органическими компонентами поровых вод и горных пород.

Ключевые слова: водород, метан, подземное хранение, поровые воды.

**Abstract.** In the aspect of joint underground storage of hydrogen with methane, the authors analyze the manifestations of hydrochemical processes which leading to the disturbance of the cap rocks and reservoirs properties in underground storages. The research is based on the results of experimental study of the external thermobaric loads effect on clay rocks and formation waters microbiological analysis of operating underground gas storage facilities. Changes in clay rocks under cyclic loads with a decrease in moisture content, a decrease in the mass of rock-forming components, and an excess of the saturation threshold with carbonate and sulfate calcium salts are considered. The main risks of deterioration of the seals and reservoirs properties associated with hydrochemical, both abiotic and some microbiological reactions between hydrogen and mineral components of pore waters and rocks have been identified.

**Keywords:** hydrogen, methane, underground storage, pore water.

#### Введение

Важными проблемами современного индустриального мира являются снижение эмиссии углекислого газа в атмосферу, декарбонизация промышленного производства с использованием высокоэффективной возобновляемой энергии. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р утверждена «дорожная карта» по развитию водородной энергетики в РФ до 2024 г. Одной из поставленных задач в этом документе является обеспечение разработки отечественных эффективных технологий хранения и транспортировки водорода.

Сибирь и Дальний Восток являются теми промышленными регионами, где планируется активное развитие технологий получения и использования водорода в качестве экологически чистого топлива. Не меньшее внимание привлекает и сопутствующая проблема хранения и транспортировки водорода до потребителя. В ИПНГ РАН начаты исследования по научному обоснованию гидрохимических и микробиологических процессов, определяющих сохранность водорода совместно с метаном в подземных хранилищах.

#### Основная часть

Прогноз возможных геохимических преобразований глинистых отложений при взаимодействии сингенетичных поровых вод с водородом выполнен на основе экспериментальных работ, имитирующих типичные для условий закачек и откачек газа в подземные хранилища циклические термобарические нагрузки.

Глинистые породы рассматривались с позиций их роли как пород-покрышек в ПХГ (образцы отобраны из разреза Кубанской сверхглубокой скважины СГ-12000 в интервале от 1200 до 1300 м); в их составе преобладают гидрослюды с примесью смектита и каолинита.

В ходе экспериментов породы были насыщены дистиллированной водой до величины максимальной молекулярной влагоемкости с последующим выделением поровых вод под циклическими нагрузками, характерными для эксплуатации ПХГ. Всего было выполнено 125 циклических нагрузок-разгрузок в условиях, наиболее характерных для закачки и отбора газа из ПХГ (под давлением, изменяющимся от 5 до 20 МПа, и температуре от 20 до 40 °C). Перед опытами и после их проведения определялись начальная влажность, максимальная гигроскопическая влажность, остаточная влажность (табл. 1) и химический состав породы.

Таблица 1. Изменение влагонасыщенности глинистых пород в процессе увеличения

циклических термобарических нагрузок

Циклы закачки-отбора газа	Wн (начальная влажность)	Wмг (максимальная гигроскопическая влажность)	Wост (остаточная влажность)	
I (P=5–10 МПа Т=20–25 °C)	21.0	7.84	10.81	
II (P=10–15 МПа Т=25–35 °C)	21.0	7.81	9.50	
III (Р=15–20 МПа Т=35–40 °С)	21.0	7.82	8.24	

Как видно из таблицы, влагонасыщенность в глинистых породах уменьшилась до 8.24 %, т.е. оказалась выше величины максимальной гигроскопической влажности (7.81–7.84), и свидетельствует о неразрушенном состоянии слоев абсорбционно-связанных вод; это важно, поскольку эти слои являются естественным препятствием для диффузии газов [1].

В опытных образцах при максимальных компрессионных-декомпрессионных нагрузках произошло снижение массы некоторых породообразующих окислов — более всего окислов железа, кальция, серы и магния (рисунок).

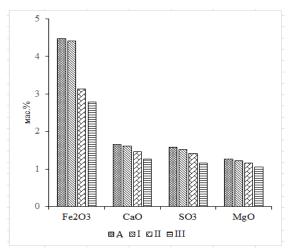


Рис. 1. Снижение массы некоторых породообразующих окислов в процессе отжима поровых вод. Параметры циклических нагрузок (I, II. III указаны в табл. 1).

Выделенные из глинистых пород поровые воды исследовались как среда проявлений физико-химических и микробиологических процессов, влияющих на окружающее геологическое пространство.

увеличением циклических нагрузок поровые воды глин становятся более минерализованными за счет растворения основных солеобразующих компонентов, что согласуется со снижением их содержания в составе пород. Химический анализ поровых вод (табл. 2) выполнялся согласно действующим ГОСТ, отдельные элементы - методом атомноэмиссионной спектрометрии индуктивносвязанной плазмой (IRIS Advantage); углерод – методом мокрого органический последующим инфракрасным сожжения С детектированием (Formacs-Toc/Tn, SKALAR).

Повышается величина рН, увеличивается содержание органических веществ (OB), и только концентрация  $SO_4$  <sup>2-</sup> и  $HCO_3$  — ионы уменьшаются, т.е. не компенсируются уменьшением серы в породе, что связано с нарушением окислительно-восстановительной обстановки в системе «поровые воды — порода». Для этого были рассчитаны индексы насыщенности поровых вод глин карбонатными ( $SICaCO_3 = log Q/K$ ) и сульфатными ( $SICaSO_4 = log Q/K$ ) солями кальция, которые показали, что карбонатно-кальциевое равновесие сохраняется практически при всех циклических нагрузках. Такая обстановка характерна для рассматриваемой системы «поровые воды — порода». Если в эту систему будет введен водород, то геохимическая

обстановка может значительно измениться, так как физико-химические реакции в подземных водах начинают проявляться при закачке водорода в ПХГ уже при давлении 0.1 МПа [2]. В результате впервые проведенного нами анализа микробиологических сообществ на трех ПХГ (Щелковское Касимовское, Калужское), расположенных в Московском гидрогеологическом бассейне, обнаружены более 100 родов бактерий и архей, потенциально способных использовать молекулярный водород в энергетическом метаболизме бактерий в анаэробных условиях. В составе микробных сообществ пластовой воды из Щелковского и Касимовского ПХГ высока доля анаэробных бактерий рода Васteroides, сбраживающих сахаросодержащие субстраты. В пробе из Калужского ПХГ (скв. 121) преобладали бактерии рода Магіповастег, способные расти при повышенной солености среды на органических субстратах. В составе архейного сообщества в этой пробе обнаружены метаногены (Methanobrevibacter и др.).

Таблица 2. Результаты анализа химического состава и органического углерода в поровых водах глинистых пород, выделенных в процессе циклических нагрузок

Циклы нагрузок	М, г/дм <sup>3</sup>		Основной химический состав поровых вод, г/дм <sup>3</sup>					Fe <sup>2+</sup> ,	Сорг.,	
		pН	Cl-	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	$\mathrm{Mg}^{2+}$	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	мкг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>
I	5.11	6.12	2.34	0.62	0.41	0.16	0.22	1.36	56	0.40
II	9.66	7.25	5.15	0.61	0.40	0.22	0.28	2.99	180	0.66
III	10.47	8.10	6.20	0.21	0.11	0.26	0.31	3.30	249	0.85

Кроме этого, в воде зафиксировано повышенное содержание низкомолекулярных органических кислот, в том числе уксусной – до 93 мг/дм<sup>3</sup>. Образование уксусной кислоты связано с декарбоксилированием  $C_3 - C_5 -$  летучих кислот, содержание которых составляет в исследованных пробах 57 мг/дм<sup>3</sup>. При декарбоксилировании масляной, пропионовой и некоторых других карбоновых кислот образуется также углекислый газ и водород:  $C_2H_5$ COOH+2 $H_2$ O  $\leftrightarrow$  CH<sub>3</sub>COOH+CO<sub>2</sub> + 3 $H_2$ .

Метаногенные бактерии (Methanobrevibacter и др.), использующие для своей энергии водород (как донора электронов), восстанавливают диоксид углерода до метана, поэтому процесс метаногенеза в  $\Pi X\Gamma$  может сопровождаться потерей водорода:  $CO_2+4H_2 \rightarrow CH_4+2H_2O$ .

Аналогичные эффекты справедливо прогнозировать и в геохимических процессах с участием поровых вод. По данным П.А. Удодова — основоположника изучения микробиологических сообществ в поровых водах, микрофлора в них обладает более высокой биологической активностью, чем в свободных водах. Было установлено, что в поровых водах скорости бактериального выщелачивания минеральных компонентов в 5–10 раз превышают развитие обычных физико-химических процессов [3]. Исследования микрофлоры в связанных водах глинистых пород, проведенные Л.С. Шварцевым, показали, что главную роль, определяющую распределение микроорганизмов в поровых водах, выполняет рассеянное ОВ, с ростом которого увеличивается численность бактерий [4].

На этой теоретической основе мы прогнозируем, что контакт геологической среды с водородом может значительно усилить геохимические эффекты в окружающем геологическом пространстве, привести к изменению химического состава поровых вод, растворению солей, выщелачиванию минеральных компонентов, а превышение порога их растворимости − к осаждению из водного раствора. В первую очередь, это относится к широко распространенным малорастворимым карбонатным минералам кальция. Увеличение величины рH, снижение гидрокарбонат-ионов в поровых водах свидетельствуют о возможности выпадения кальцита: Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>←CaCO<sub>3</sub>↓+CO<sub>2</sub>↑+H<sub>2</sub>O.

Как следствие, могут изменяться в худшую сторону фильтрационно-емкостные свойства пород-коллекторов. Выпадение цемента в виде CaCO<sub>3</sub> должно улучшать изоляционные свойства глинистых покрышек.

Повышение pH и осаждение карбоната кальция способствуют растворению доломитов —  $CaMg(CO_3)_2$ :  $2CaMg(CO_3)_2+SiO_2 \leftrightarrow 2CaCO_3+2CO_2+MgSiO_4$ . В присутствии водорода возможна реакция его взаимодействия с доломитом [5]:  $5H_2+MgCa(CO_3)_2 \leftrightarrow CH_4+Mg^{2+}+3H_2O+CaCO_3$ .

Хранение водорода совместно с метаном вызывает ряд микробиологических процессов [6]. Рассчитанные для изучаемых поровых вод коэффициенты их насыщения сульфатными минералами кальция ( $SI_{CaSO4}$ ) показали весьма низкие значения. Поровые воды исследуемых глин недонасыщены гипсом, ангидритом, бассанитом, при том что вынос серы из пород фиксируется (рисунок). В опытных образцах глинистых пород начальное содержание  $SO_3$  составляет 1.58 мас. %, но по мере увеличения внешних циклических нагрузок в породе осталось лишь 1.16 мас. %  $SO_3$ . В поровых водах, выделенных из глинистых пород, содержание  $SO_4^{2-}$  не компенсировалось потерями серы в породе, наоборот, даже снизилось с 0.62 до 0.29 г/дм<sup>3</sup>. Это свидетельствует о том, что выпадение сульфатных солей кальция из раствора для данной системы не характерно. Сложившаяся геохимическая ситуация, вероятнее всего, связана с проявлением микробиологических процессов сульфатредукции. Поровые воды становятся агрессивными по отношению к вмещающим породам. Восстановление сульфатов происходит по классической схеме сульфатредукции с участием органических веществ и жизнедеятельности микроорганизмов:  $SO_4^{2-} + 2C_{opr} \rightarrow S^{2-} + 2CO_2$ .

В присутствии водорода, используемого микроорганизмами в качестве энергетического материала, процесс сульфатредукции идет по такой схеме:  $SO_4^{2-}+4H_2 \rightarrow S^{2-}+4H_2O$ .

Конечным результатом этих процессов являются восстановленные формы серы и углекислоты. Присутствие серы в породах  $\Pi X \Gamma$ , в поровых, пластовых и конденсационных водах всегда будет являться неблагоприятным фактором для хранения водорода в  $\Pi X \Gamma$ .

В поровых водах растворение сероводорода первоначально сопровождается снижением pH; формируется раствор слабой двухосновной кислоты ( $H_2SO_4$ ) с коррозийным воздействием на поровое пространство коллекторов, увеличивая его в объеме, снижая при этом герметичные свойства пород-покрышек:  $H_2S \rightarrow H^+ + HS^-$ ;  $HS^- \rightarrow 2H^+ + S^{2-}$ . Восстановленные сульфиды, растворяясь в поровых, пластовых, конденсационных водах, повышают pH среды за счет образования гидроксильной группы ионов:  $S^{2-} + H_2O \rightarrow HS^- + OH^-$ .

Такие реакции сопровождаются осаждением нерастворимых осадков – сульфидов металлов, например сульфида железа.

Из полученного материала исследований видно, что при воздействии максимальных циклических нагрузок исследуемые породы теряют  $Fe_2O_3$ , а в поровых водах повышается содержание ионов  $Fe^{2+}$ . Можно полагать, что ионы  $Fe^{2+}$  железа частично переходят в воду за счет физико-химических реакций. Но нельзя исключить роль железоредуцирующих бактерий, так как они могут активно развиваться в присутствии сульфат-ионов [7]. Совместная деятельность железоредуцирующих и сульфатредуцирующих бактерий усиливает реакционную способность серы и железа, может оказывать существенное воздействие на физико-химические свойства водной среды и трансформацию пород в ПХГ, приводить к изменению их емкостно-фильтрационных свойств и структуры порового пространства.

Моделирование гидрохимических процессов показало, что даже в низкотемпературных условиях термодинамическая стабильность некоторых минералов нарушается при изменении окислительно-восстановительной обстановки, вызванной реакционными способностями водорода [8]. Восстановительные свойства водорода способствуют его реакциям с некоторыми элементами, находящимися в породах в окисленной форме. Известно, например, что в присутствии водорода происходит восстановление пирита до пирротина [9]:  $FeS_2 \rightarrow FeS \rightarrow FeS_x(1 < x \le 2)$ .

Рассмотренные выше процессы, происходящие между породой и поровыми водами (с учетом переменных циклических нагрузок), могут возникать как абиотическим путем, так и с участием бактерий. Однако кинетические скорости этих реакций значительно возрастают с усилением жизнедеятельности микроорганизмов при поступлении водорода [10].

#### Выводы

- 1. Установлены риски проявления гидрохимических эффектов при подземном хранении водорода с метаном. Показано, что наибольшие изменения в свойствах породпокрышек и коллекторов происходят при максимальных компрессионных декомпрессионных циклических нагрузках ( $P=15\leftrightarrow 20$  МПа,  $T=35\leftrightarrow 40$  °C):
- снижается влагонасыщенность пород, что может привести к критической величине остаточной влажности, ухудшению экранирующих свойств пород-покрышек;
- снижаются количественные содержания органических веществ и породообразующих окислов (особенно CaO, SO<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), что приводит к ухудшению изоляционных свойств пород подземного резервуара;
- увеличивается степень насыщенности поровых вод карбонатом кальция, что приводит к выпадению карбонатного цемента в поровом пространстве пород-коллекторов и сопровождается изменением их емкостно-фильтрационных параметров;
- увеличивается степень недонасыщенности поровых вод сульфатными минералами кальция, что придает им агрессивный характер, усиливающий процессы растворения, выщелачивания и приводящий, возможно, к улучшению фильтрационных свойств пористых коллекторов, к разрушению структуры пород-покрышек, усилению диффузионных процессов и утечке газов из ПХГ.
- 2. Прогнозируется, что в условиях подземного хранения водород-метановых смесей будут активизированы микробиологические реакции, изменяющие свойства пород в подземных резервуарах за счет жизнедеятельности микроорганизмов (метаногенных, ацетогенных, сульфатредуцирующих, железоредуцирующих и др.), продуцирующих метан, углекислоту, восстановленные формы серы, железа и приводящих к потерям водорода, трансформации пород, продуцированию агрессивных флюидов и др.
- 3. Гидрогеохимические процессы, влияющие на изоляционные свойства пород, следует учитывать при совместном хранении водород-метановых смесей. Все риски проявления подобных процессов должны оцениваться на конкретных объектах с учетом индивидуальных литологических, минералогических, гидрогеологических и петрофизических свойств пород-покрышек и коллекторов ПХГ, предназначенных для хранения водород-метановых смесей.

#### Список литературы

- 1. Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В. Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. М.: Наука, 2001. 114 с.
- 2. Lassin A., Dymitrowska M., Azaroual M. Hydrogen solubility in pore water of partially saturated argillites: Application to Callovo-Oxfordian clayrock in the context of a nuclear waste geological disposal // Physics and Chemistry of The Earth. 2011. 36. 1721–1728.
- 3. Удодов П.А., Коробейникова Е.С., Рассказов Н.М. и др. Поровые воды как среда обитания микроорганизмов. Новосибирск: Наука, 1981. 176 с.
- 4. Шварцев С.Л., Коробейникова Е.С., Назаров А.Д., Рассказов Н.М., Трифонова Н.А. Химический и микробиологический состав физически связанных вод юго-востока Западной Сибири // Геология и геофизика. 1994. № 3. С. 70–79.
- 5. Machel H.G., Mountjoy E.W. Chemistry and Environments of Dolomitization A Reappraisal // Earth Science Reviews. 1986. 23 (3). 175–222, doi:10.1016/0012-8252(86)90017-6.
- 6. Carden P.O., Paterson L. Physical, chemical and energy aspects of underground hydrogen storage // International Journal of Hydrogen Energy. 1979. V.4. P. 559–569. 10.1016/0360-3199(79)90083-1.
- 7. Иванова А.Е., Борзенков И.А., Тарасов А.Л., Милехина Е.И., Беляев С.С. Микробиологические исследования на объектах подземного газового хранилища в процессе закачки газа // Микробиология. 2007. Т. 76, № 4. С. 515–523.
- 8. Berta M., Dethlefsen F., Ebert M., Schäfer D., Dahmke A. Geochemical Effects of Millimolar Hydrogen Concentrations in Groundwater: An Experimental Study in the Context of Subsurface Hydrogen Storage // Environmental science & technology. 2018. 528. 4937–4949.
- 9. Truche L., Jodin-Caumon M., Lerouge C., Berger G., Mosser-Ruck R., Giffaut E., Michau N. Sulphide mineral reactions in clay-rich rock induced by high hydrogen pressure. Application to disturbed or natural settings up to 250 °C and 30 bar // Chemical Geology. 2013. 351. 217–228.
- 10. Bernardez L.A., Lima L.R., Jesus E.B., Ramos C.L., Almeida P.F. A kinetic study on bacterial sulfate reduction // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2013. 36. 1861–1869.

# РАЗРАБОТКА ГЕОФИЛЬТРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ СОПРОВОЖДЕНИЯ ДОБЫЧИ УРАНА МЕТОДОМ ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ НА ХИАГДИНСКОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-454-457

Волкова М.К.  $^{1,2}$ , Василевский П.Ю.  $^{1,2}$ , Кортунов Е.В.  $^1$ , Самарцев В.Н.  $^1$ , Лехов В.А.  $^1$ , Солодов И.Н.  $^3$ , Поздняков С.П.  $^1$ 

<sup>1</sup> Московский государственный гниверситет им. М.В. Ломоносова, Москва, hydro@geol.msu.ru

<sup>2</sup> AO «ВНИПИпромтехнологии», Москва, Volkova.m.k@vnipipt.ru
<sup>3</sup> AO «APM3», Москва, INSolodov@armz.ru

Аннотация. По результатам анализа материалов о геологическом строении и мерзлотногидрогеологических условиях Хиагдинского месторождения обоснована природная гидрогеологическая модель формирования потока подземных вод. На ее основе разработана региональная геофильтрационная модель месторождения, которая откалибрована по замерам напоров подземных вод, выполненным на этапе разведки месторождения, и воспроизводит естественное положение уровней. Разработанная модель представляет собой основу для создания системы постоянно действующих моделей-врезок отдельных палеодолин месторождения. В результате анализа исходных данных, обоснования геофильтрационной схемы, калибрации модели и установления с ее помощью закономерностей формирования регионального баланса подземных вод получена возможность для совершенствования и оптимизации скважинного подземного выщелачивания урана из рудных залежей.

**Ключевые слова:** палеодолина, месторождение урана, геофильтрационная модель, калибрация, гидрогеохимия.

Abstract: Conceptual model for Khiagda uranium ore field was developed based on data analysis of on geological, hydrogeological and permafrost conditions. Regional groundwater flow model was developed based on that conceptual model. Groundwater flow model was calibrated using head observations during ore field exploration stage. Thus, regional groundwater model represents groundwater heads under natural conditions. Regional groundwater model is the basis for development of series of constantly-maintained local models for individual buried valleys of ore field. Possibility of underground leaching optimisation during ore field development was achieved as a result of: initial data analysis, groundwater flow conceptualisation, regional groundwater flow model calibration and identification of regional flow patterns.

**Key words:** buried valley, uranium ore field, groundwater flow model, model calibration, hydrogeochemistry.

Хиагдинское месторождение относится к экзогенному эпигенетическому (гидрогенному) классу урановых месторождений палеодолинного типа. Оно расположено в южной части Витимского плоскогорья, на южном фланге Амалатского плато базальтов, на юго-восточном склоне Байсыханского поднятия, в левобережье р. Витим. Рассматриваемое месторождение объединяет одиннадцать неогеновых рудоносных палеодолин северозападной ориентировки, рудные тела в которых занимают площадь 1.68 км² [1].

Месторождение отрабатывается скважинным подземным выщелачиванием (СПВ). Для этого метода добычи урана принципиальным является наличие благоприятных гидрогеологических условий залегания рудных залежей (коэффициент фильтрации рудоносных отложений, их мощность, глубина залегания). Рассматриваемый объект характеризуется крайне сложными недостаточно изученными на стадии геологоразведочных работ гидрогеологическими характеристиками: рудоносные осадочные отложения перекрыты базальтовым покровом и в верхней части проморожены до глубины 50–70 м; при наличии естественного потока подземных вод неизвестны пути инфильтрации метеорных вод; в области транзита по специфическому гидрокарбонатно-магниевому составу подземных вод установлена очаговая эксфильтрация; на структуру потока влияет разрывная тектоника СВ-простирания; разная степень обводненности рудных тел.

Цель разработки гидродинамической модели Хиагдинского месторождения — изучение гидрогеологических условий как основы для совершенствования и оптимизации процесса СПВ урана из рудных залежей.

В геологическом строении Хиагдинского месторождения выделяются два структурных этажа: преимущественно гранитный гетерогенный фундамент палеозойского ( $PZ_{2-3}v$ ) возраста и кайнозойский чехол вулканогенно-осадочных отложений. Верхний структурный этаж в основании разреза сложен осадочными пролювиально-делювиально-аллювиальными ураноносными отложениями нижнеджилиндинской подсвиты ( $N^{2-3}_1 dz_1$ ). Выше по разрезу их сменяют вулканогенно-осадочные отложения верхнеджилиндинской подсвиты ( $N^{2-3}_1 dz_2$ ). Верхнеджилиндинские отложения конседиментационно покрывает базальтовый трап хойготской свиты ( $N_2 dz_2$ ).

Хиагдинское месторождение является наиболее крупным из восьми месторождений Хиагдинского рудного поля Витимского ураново-рудного района (Забайкалье). По состоянию на 01.10.2013 г. его балансовые запасы оценены в 10574 т урана. Отличительной чертой Хиагдинского месторождения, которая делает его непохожим на аналогичные объекты, является суровый климат района, обуславливающий низкую температуру подземных вод и повсеместное распространение многолетнемерзлых пород (ММП).

Для исследования Хиагдинского месторождения был использован метод численного гидродинамического моделирования. Гидродинамическая модель создавалась по материалам собранной базы геологических, гидрогеологических и геокриологических данных, объединяющей результаты геологоразведочных и опытных работ на месторождении.

С помощью кода Modflow-2005 [2] была создана региональная геофильтрационная модель Хиагдинского месторождения, в которой ряд разобщенных погребенных палеодолин рассматривается как единая гидродинамическая система. Пространственная структура геофильтрационного потока — квазитрехмерная. Модель воспроизводит среднемноголетнее состояние геофильтрационного потока Хиагдинского месторождения до начала промышленного освоения, таким образом расчеты велись в стационарном режиме.

Разработанная модель включает толщу вулканогенных и осадочных пород от поверхности земли до гранитного фундамента. Поверхность земли построена по картограмме абсолютных отметок по данным SRTM [3]. В геофильтрационной схеме выделено пять расчетных слоев:

- 1. Многолетнемерзлые породы хойготской нижнеджилиндинской подсвиты, мощность которых схематично задана равной 50 м, так как существуют лишь единичные замеры толщины ММП, демонстрирующие, что мощность толщи мерзлых пород на Хиагдинском месторождении составляет 50–70 м. Слой задан неактивным и сохранен в модели для более наглядного представления результатов.
  - 2. Проницаемые прослои трещиноватых базальтов ниже границы ММП.
- 3. Массивные базальты в нижней части вулканогенной толщи. Мощности второго и третьего модельных слов заданы как равные доли талой толщи вулканогенных пород.
- 4. Терригенные ураноносные отложения неогеновых палеодолин нижнеджилиндинской подсвиты. В пределах палеодолин II и III порядка мощность интерполирована в соответствии с паспортами скважин, а в пределах стволовой Амалатской палеодолины I порядка мощность отложений схематично задана равной 50 м.
  - 5. Мощность коры выветривания гранитного фундамента принята равной 5 м.

Согласно существующим представлениям о структуре регионального потока подземных вод, разгрузка вод продуктивной толщи осуществляется за счет латерального потока. Из палеодолин III порядка поток разгружается в палеодолины II порядка, из которых поток разгружается в Амалатскую палеодолину I порядка. Направление потока подземных вод по Амалатской палеодолине не исследовано. По этой причине западная и восточная границы заданы для Амалатской палеодолины как границы I рода с постоянным уровнем.

Плановые границы модели различаются для выделенных слоев. Для второго и третьего слоя они выбраны по совпадению водосборных границ локальных потоков подземных вод с границами поверхностных водосборов. Поверхностные водотоки приняты как внутренние граничные условия III рода. Разгрузка фильтрационного потока проницаемой зоны базальтов осуществляется в поверхностные водотоки через подрусловые талики.

Четвертый и пятый модельные слои имеют более сложную конфигурацию в плане. Плановые границы палеодолин приняты непроницаемыми. Исключением является группа разломов между залежами X-3 и X-4. В ходе разработки региональной модели было выдвинуто предположение, что трещиноватые зоны этих разломов обеспечивают взаимодействие между указанными залежами.

Важным структурным элементом является Хиагдинский разлом. Он простирается в направлении с юго-запада на северо-восток и пересекает все палеодолины. В некоторых палеодолинах вертикальное смещение по разлому превышает мощность продуктивной толщи, что обусловливает затрудненное взаимодействие фильтрационных потоков по разлому. В связи с этим в модели разлом задается как слабопроницаемый барьер с различным фильтрационным сопротивлением для каждой залежи.

Питание продуктивной толщи осуществляется за счет перетекания как сверху (инфильтрация), так и снизу (эксфильтрация). Снизу, из фундамента, по разломам С-3 простирания поступают холодные углекислые воды. Сверху идет перетекание из проницаемой зоны базальтов хойготской свиты. В свою очередь, в проницаемую зону базальтов инфильтрационное питание поступает через талики в толще ММП и, возможно, через зияющие трещины на южных склонах центральной части Байсыханского поднятия. По имеющимся данным гидрогеохимического опробования невозможно надежно выделить доли эксфильтрационного и инфильтрационного питания продуктивных залежей. Вместе с тем анализ проб подземных вод из погребенных палеодолин позволяет утверждать, что часть питания действительно поступает с поверхности земли сквозь толщу ММП.

Определение соотношения двух указанных источников питания потребует проведения дополнительных полевых исследований, таких как гидрогеохимическая съемка, резистивиметрия и трассерные эксперименты при естественном градиенте. Поскольку отложения погребенных палеодолин в региональной модели схематизированы одним расчетным слоем, тип источника питания не влияет на расчетные напоры подземных вод, важен только общий расход питания при естественном гидравлическом градиенте. В связи с этим в модели суммарное питание принято только инфильтрационным и задано диффузным по всей площади. Нижняя граница модели схематизирована непроницаемой.

Распределение фильтрационных параметров задавалось на основе обработки опытнофильтрационных работ и по данным лабораторных исследований. Величина инфильтрационного питания не была определена по результатам геологоразведочных работ и ориентировочно оценена по карте ресурсного потенциала пресных подземных вод [4].

Для калибровки модели были использованы данные 555 замеров статических уровней подземных вод, полученные в период с 1994 до 2013 г. При калибровке модели происходило как уточнение геофильтрационных параметров, так и корректировка геофильтрационной схемы с учетом недостаточной изученности гидрогеологических условий. По изначальному предположению геофильтрационный поток разгружается из палеодолин II порядка в Амалатскую палеодолину I порядка. Измеренные напоры в залежи X-4 аномально низкие, ниже, чем расчетные напоры в Амалатской палеодолине. Наиболее вероятным объяснением обратного направления потока в палеодолине залежи X-4 является существование перетекания подземных вод по приразломной зоне трещиноватости в палеодолину залежи X-3. В остальном разработка модели на основе ранее принятой геофильтрационной схемы позволила воспроизвести известные напоры с удовлетворительной точностью.

С помощью откалиброванной геофильтрационной модели получено распределение напоров в водоносных горизонтах в естественных условиях с учетом напорно-безнапорного характера фильтрации. В ходе калибровки модели невязка между фактическими и модельными напорами снижена до удовлетворительного уровня — стандартное отклонение разницы наблюденных и модельных значений напоров составляет 2.28 м, а средняя невязка составила 0.1 м. Стандартная ошибка калибрации составляет около 2 % от наблюденного перепада напоров, что свидетельствует об успешности калибровки региональной модели и возможности ее использования как основы для последующих расчетов.

По результатам работы даны рекомендации по получению дополнительной информации для верификации полученной геофильтрационной схемы. Рекомендуемые опытные работы должны быть направлены на установление направления потока между стволовой Амалатской палеодолиной и залежью X-4, а также на определение наличия или отсутствия гидродинамической взаимосвязи между палеодолинами залежей X-3 и X-4.

геофильтрационной Проведен геостатистический анализ продуктивного водоносного горизонта. Пространственное моделирование осуществлялось методом ординарного кригинга. Результаты этого анализа в целом хорошо согласуются с распределением коэффициентов фильтрации, полученных при подборе оптимальных параметров модели, за исключением верховьев палеодолин, для которых результаты калибровки противоречат значениям, рассчитанным на основе изучения разрезов разведочных и эксплуатационных скважин. Результаты калибровки дают систематически меньшие значения в верховьях палеодолин, чем результаты геостатистического анализа данных полевых опробований. Скорее всего, подобная невязка связана с недостаточно корректным заданием в модели толщины ММП, которая лимитирует обводненную мощность водоносного горизонта, так как в верховьях палеодолин лишь часть отложений продуктивного горизонта находится в талом состоянии. Это показывает важность изучения глубины распространения ММП в верховьях погребенных палеодолин. Рекомендуется постановка полевых исследований с целью картирования мощности ММП.

В результате работы обоснована региональная геофильтрационная модель, которая будет использована как основа для локальных моделей-врезок отдельных залежей Хиагдинского месторождения. Рекомендованы виды дополнительных исследований для доизучения гидрогеологических условий и верификации принятой геофильтрационной схемы модели. Проведенные исследования подчеркивают необходимость постановки детальных гидрогеологических исследований на стадии геологоразведочных работ для эффективной эксплуатации месторождения в столь сложных геолого-структурных, геокриологических и гидрогеологических условиях.

#### Список литературы

- 1. Геотехнология урана (российский опыт) / Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017.576 с.
- 2. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. // Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2005. C. 6-A16.
- 3. SRTM 90m Digital Elevation Database v4.1 [сайт] / CGIAR Con-sortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). URL: https://cgiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/ (дата обращения 28.07.2020)
- 4. Боревский Б.В., Зекцер И.С., Язвин А.Л. и др. Карта ресурсного потенциала пресных подземных вод России. Масштаб 1:5 000 000. М.: ЗАО "ГИДЭК". 2013.

### ЭКОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОЛИГОЦЕН-ЧЕТВЕРТИЧНОГО КОМПЛЕКСА ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО МЕГАБАССЕЙНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-458-462

Гуляева Ю.В.  $^{1}$ , Ковяткина Л.А.  $^{2}$ , Курчиков А.Р.  $^{1}$ , Трофимова Н.С.  $^{2}$   $^{1}$ ЗапСибИПГНГ, Тюмень

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень, bespalova y@mail.ru

Аннотация. В статье обоснована этапность решения одной из важнейших эколого-гидрогеологических проблем — загрязнения подземных вод; предложены рекомендации по изучению природных и техногенных факторов формирования подземных вод, выделены типы техногенных гидрогеологических систем с характерными маркерами-загрязнителями. Приведены результаты моделирования ореолов загрязнения подземных вод. Оценена природная защищенность пресных подземных вод с учетом сорбционных свойств слабопроницаемых отложений, перекрывающих основной водоносный горизонт.

**Ключевые слова:** техногенные гидрогеологические системы, маркеры-загрязнители, моделирование, сорбция, защищенность.

**Abstract.** The stages of solving ecological and hydrogeological problems are substantiated in the article. The article is devoted the problem of groundwater pollution. Recommendations for the study on natural and man-made factors of the groundwater formation are proposed. The types on technogenic hydrogeological systems with accompanying markers-pollutants are identified. The results on modeling halos of the groundwater pollution are presented. The natural protection on fresh groundwater is estimated taking into account the sorption properties of weakly permeable sediments covering the aquifer.

**Key words:** technogenic hydrogeological systems, modeling, sorption, vulnerability.

В эпоху глобального загрязнения природной среды и сокращения ресурсов пресной воды все более актуальной становится проблема экологической защищенности подземных источников водоснабжения.

Как известно, существует две основные проблемы экологической защищенности подземных вод – их истощение и загрязнение. Пресные подземные воды распределены на Земле весьма неравномерно, и многие регионы характеризуются очень низкой обеспеченностью ресурсами питьевых вод. Если сравнивать величину модуля подземного стока Западно-Сибирского мегабассейна (ЗСМБ) и европейской части РФ с таковым в других геологических регионах, то можно сделать вывод о том, что вопрос истощения подземных вод для большей части России остро не стоит.

Величины модулей подземного стока в пределах европейской части РФ закономерно уменьшаются с северо-запада на юго-восток от 6—4 л/с·км² в районах Прибалтики до 0.1—1.0 л/с·км² в степях южных районов России и Украины. В Западной Сибири с севера на юг отмечается уменьшение модулей стока от 3.0-2.5 в районе Обской губы и Енисейского залива до 0.5—0.3 л/с·км² в Северном Казахстане, Барабинской и Кулундинской степях [2].

Более значима проблема оценки загрязнения подземных вод под влиянием техногенеза. К ее решению необходимо подходить комплексно, в несколько этапов: 1) изучение естественных факторов формирования подземных вод; 2) изучение антропогенной нагрузки и выделение типов техногенных гидрогеологических систем (ТГГС) с характерными маркерами-загрязнителями; 3) моделирование ореолов загрязнения подземных вод; 4) оценка природной защищенности подземных вод. Остановимся подробно на каждом из перечисленных этапов.

Изучение естественных факторов формирования подземных вод, определение природных фоновых концентраций растворенных в подземных водах веществ дают возможность избежать неверной интерпретации превышений концентраций некоторых компонентов в среде (аммоний, железо, марганец и т.д.) относительно ПДК для питьевых вод.

Следующий этап — изучение антропогенной нагрузки и выделение типов ТГГС с характерными маркерами-загрязнителями. Анализ техногенной нагрузки на территорию подразумевает выявление совокупности тесно связанных между собой гидрогеологических и

инженерно-геологических процессов с соответствующими гидрогеохимическими маркерами-загрязнителями для каждого из типов ТГГС.

К наиболее значимым факторам, определяющим главные типоморфные отличия подземных вод под действием техногенеза в условиях нефтегазодобывающего региона, относится несоответствие нормативным требованиям технического состояния скважин различного назначения и прилегающей к ним территории, отсутствие систематического контроля качества добываемой воды и влияние количества отбираемого флюида (воды, нефти, газа) на режим уровней пресных подземных вод [5].

Для каждого района характерны свои типы техногенных гидрогеологических систем, выделяемых по разным критериям [1, 4, 10, 7, 8 и др.]. Типизация ТГГС должна проводиться по ведущему фактору техногенного воздействия. Для крупных территориальных комплексов целесообразно выделять главенствующие виды деятельности и объекты, оказывающие наибольшее воздействие на природную среду и на подземные воды.

Так, для Тобольского бассейна стока подземных вод характерна урбанизационная загруженность, поскольку на его территории расположены крупные города (Тюмень, Тобольск и др.) с развитой промышленностью, для Среднеобского бассейна стока техногенную нагрузку определяют интенсивная нефтедобыча, транспортировка и переработка сырья, в Тазовском бассейне стока ведущую роль играет интенсивная эксплуатация, прежде всего, газовых месторождений, а из природных факторов — наличие многолетнемерзлых пород (ММП), их деградация и вытекающие отсюда последствия.

Особое внимание необходимо уделять выявлению маркеров-загрязнителей, их накоплению и миграции, что достигается ведением регулярного мониторинга состояния подземных вод. Выделяемые маркеры — загрязнители в каждом из типов ТГГС понимаются как локальные скопления в подземных водах компонентов, обладающих антропогенным генезисом и отличающихся от природного гидрогеохимического поля.

На рисунке 1 показаны выявленные по результатам многолетних наблюдений за режимом пресных подземных вод маркеры-загрязнители Тобольского, Среднеобского и Тазовского бассейнов стока подземных вод. Рассматриваемые бассейны стока подземных вод — это резервуары в пределах олигоцен-четвертичного комплекса, формирующиеся в условиях тесной взаимосвязи с поверхностными водами. В границах бассейнов стока подземных вод, практически совпадающих с бассейнами рек, происходит зарождение и формирование потоков подземных вод зоны дренирования равнины.

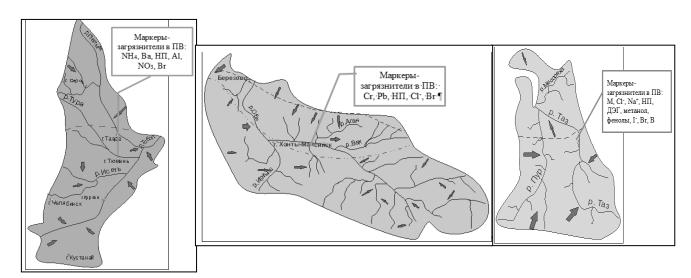


Рис. 1. Маркеры-загрязнители пресных подземных вод Тобольского, Среднеобского и Тазовского бассейнов стока подземных вод.

Третьим этапом решения проблемы оценки загрязнения подземных вод является моделирование ореолов их распространения. По результатам численного моделирования фильтрационных потоков подземных вод возможно определение предельной зоны захвата фильтрационного потока водозаборных скважин, что было получено на региональной модели водоносных комплексов одного из районов центральной части Среднеобского бассейна стока подземных вод [12]. Метод дает возможность оценить условия загрязнения эксплуатируемых водоносных горизонтов с учетом пространственной локализации потенциальных источников загрязнения.

районирования выбрать Составленная модель позволяет поверхностное или глубинное загрязнение может попасть в зону захвата водозаборной скважины, и указать территории или площади, в пределах которых очаги загрязнения не могут ухудшать работу эксплуатационных скважин ни при каких условиях. Таким образом, в условиях техногенной нагрузки на ПВ использование региональной модели ореола загрязняющих веществ позволяет распространения оценить опасность потенциального источника загрязнения по его географическим координатам, что, в свою очередь, позволит оптимально организовать наблюдательную сеть мониторинговых исследований.

Четвертым — заключительным — этапом работы является оценка природной защищенности ПВ. Под защищенностью ПВ от загрязнения понимается надежная изоляция водоносного горизонта отложениями (прежде всего слабопроницаемыми), препятствующими проникновению загрязняющих веществ с поверхности земли в подземные воды, т.е. способность перекрывающих отложений противостоять загрязнениям «сверху». Защищенности ПВ уделяется много внимания, однако данный вопрос окончательно еще не изучен. Анализ наиболее распространенных методик оценок защищенности ПВ авторами проведен ранее [2, 12]. В данной статье представлен методический прием, позволяющий учесть процессы сорбции загрязнителей.

Согласно [6], сорбция и поглощение вещества породой могут быть учтены в расчетах защищенности  $\Pi B$  путем деления расчетного времени  $T_{\text{расч}}$  (по любой из выбранных методик) на величину A:

$$T = Tpacq/A$$
,

где  $A = (1+\beta)/\beta$ ,  $\beta$  – коэффициент распределения (сорбции).

Для слабопроницаемых отложений ЗСМБ, согласно проведенным нами лабораторным исследованиям, среднее значение сорбции равно 16.6 мг-экв/100 г [3], тогда А=1.06 д.ед.

При полученных коэффициентах в соответствии с формулой время просачивания должно сокращаться, что не соответствует физико-химической сути процесса.

Расчеты становятся корректными, если учесть следующее обстоятельство. В работе [11] обосновывается корректность введения в расчеты вместо активной пористости ( $\mathbf{n}_0$ ) «эффективной» (фиктивной) пористости ( $\mathbf{n}_0$ ), определяемой по формуле:

$$n_{3} = n_{0} \cdot (1+N),$$

где N — приведенная сорбционная емкость (в нашем случае определенная лабораторным путем и выраженная через коэффициент A= 1.06).

Получаем, 
$$n_3 = 0.2 \cdot (1+1.06) = 0.412$$
 д.ед.

При анализе данной зависимости необходимо иметь в виду, что активная пористость определяется совокупностью пор и других пустот, по которым подземная вода может свободно передвигаться в горных породах, не испытывая заметного притяжения и трения со стороны стенок, так как эти стенки покрыты гигроскопической и пленочной водой. Активная пористость по объему соответствует водоотдаче [9]. Диапазон изменения значений активной пористости песков и глин изменяется от 0.15 до 0.55, полученная лабораторным путем величина «эффективной» пористости (0.4) попадает в указанный диапазон значений. Тогда, если вместо обычно принимаемого значения пористости (0.15–0.20) оперировать значением

0.4, то искомая величина Ts (время проникновения загрязняющих веществ с учетом сорбции) будет в два раза и более выше.

Расчеты получены по данным 80 скважин, расположенных в пределах Вартовского нефтегазоносного района, включающего Лор-Еганский, Орехово-Ермаковский, Северо-Покурский, Аганский, Самотлорский, Ватинский лицензионные участки. Максимальное время просачивания соответствует наличию в разрезе многолетнемерзлых пород, а минимальное – перекрывающей толще песков.

Итоговая карта защищенности пресных ПВ от загрязнений «сверху» с учетом сорбционной способности слабопроницаемых отложений изображена на рисунке 2.

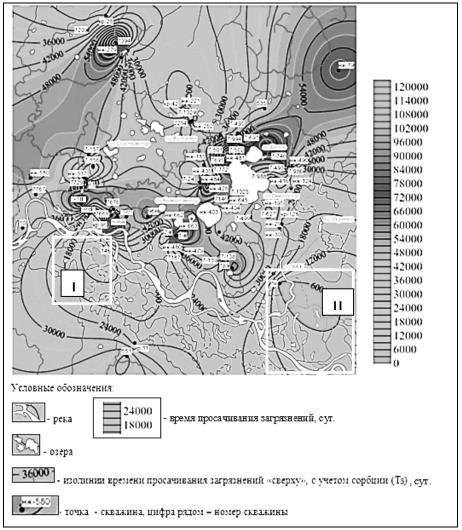


Рис. 2. Карта защищенности пресных подземных вод Вартовского нефтегазоносного района. Масштаб 1:50000 (Ю.В. Гуляева, 2018 г., с дополнениями Л.А. Ковяткиной, 2020 г.)

На основании значений времени просачивания и срока эксплуатации водозаборов (25 и 50 лет) предлагается категоризация защищенности по баллам: 1-я категория — незащищенные ПВ (Ts= 0-3000 сут); 2-я категория — слабозащищенные ПВ (Ts= 3000-6000 сут); 3-я категория — защищенные ПВ (Ts= 6000-10000 сут); 4-я категория — достаточно защищенные (Ts= 10000-19000 сут); 5-я категория — надежно защищенные (Ts= более 19000 сут). Анализируя сложившуюся обстановку, можно сделать вывод о том, что подземные воды в основном достаточно защищены от поверхностных загрязнений, так как время просачивания загрязнений в несколько раз превышает время эксплуатации водозаборов (свыше 25 лет — 9125 сут и даже 50 лет — 18250 сут).

Тем не менее в долинах р. Оби и ее притоков литология пород с преобладанием в перекрывающей толще песков способствует выделению зон слабозащищенных вод (участки

I и II на карте). В данных условиях необходимо особенно тщательно планировать мониторинговую сеть наблюдательных скважин, проводить детальный анализ химического состава пресных подземных вод, а также поверхностных вод и почв, которые могут служить источниками загрязнения ПВ.

Учитывая вышеизложенное, можно сделать следующие выводы. Сорбционная способность слабопроницаемых отложений — необходимый параметр, характеризующий «барьерные» способности перекрывающих отложений. Оперировать данным параметром важно при оценке защищенности подземных вод. Несмотря на то, что время просачивания загрязнений с учетом сорбции слабопроницаемых отложений Тѕ в два раза и более больше времени без учета сорбции, были выявлены и отмечены на карте локальные зоны слабозащищенных вод. Учет сорбции в расчетах не всегда предопределяет повышенную степень защищенности ПВ, но дает более детальную картину естественной способности геологической среды противостоять распространению загрязнений.

Таким образом, с помощью комплексного подхода к решению экологогидрогеологических задач можно своевременно предотвратить распространение загрязнения в подземных водах, оптимально организовать мониторинговую сеть и сохранить качество подземных вод. Предложенные подходы поэтапного изучения современного состояния ТГГС и методы контроля позволят повысить экологическую безопасность эксплуатации подземных вод.

#### Список литературы

- 1. Абалаков А.Д. Экологическая геология. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета, 2007. 267 с.
- 2. Беспалова Ю.В. О многофакторном подходе к оценке защищенности водоносных горизонтов и комплексов при освоении нефтегазоносных районов Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Нефть и  $\Gamma$ аз. 2015. № 3. С. 6–13.
- 3. Беспалова Ю.В. Сорбционные свойства глин важнейший фактор естественной защищенности подземных вод от загрязнения // Науки о Земле. Современное состояние: Материалы IV Всерос. молодежной науч.-практ. школы-конф. Геологический полигон «Шира». Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. 212 с.
- 4. Карцев А.А., Гаттенбергер Ю.П., Зорькин Л.М. Теоретические основы нефтегазовой гидрогеологии. М.: Недра, 1992. С. 183–195.
- 5. Курчиков А.Р., Вашурина М.В. Аспекты экологической безопасности при эксплуатации водозаборов пресных подземных вод на месторождениях нефти Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2016. № 1. С. 21–27.
- 6. Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ второго и третьего поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1983. 103 с.
- 7. Матусевич В.М., Ковяткина Л.А. Техногенные гидрогеологические системы нефтегазоносных районов Западной Сибири // Известия вузов. Нефть и газ. 1997. №1. С. 41–46.
- 8. Матусевич В.М., Курчиков А.Р., Ковяткина Л.А. Актуальные проблемы нефтегазовой гидрогеологии Западно-Сибирского мегабассейна // Материалы Всероссийской научной конференции «Современная гидрогеология нефти и газа. Фундаментальные и прикладные вопросы». М.: ГЕОС, 2010. С. 55–61.
- 9. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии / Сост. А.А. Маккавеев, ред. О.К. Ланге. М.: Гостоптехиздат, 1961. 73 с.
  - 10. Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. Экологическая геология. М.: Геоинформмарк, 2002. 415 с.
- 11. Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков. М.: ВОДГЕО, 1961. 95 с.
- 12. Bespalova J.V., Matusevich V.M., Popov V.K., Kuzevanov K.I. Assessment of fresh groundwater vulnerability to contamination caused by production operations in oil and gas fields of Nizhnevartovsk Region (Western Siberia) [Electronic resource] // Access mode: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 43. P. 1–6.

## ОЧИСТКА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧЕ КИСЛОРОДА И ПРИМЕНЕНИИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-463-465

Деменев А.Д.<sup>1</sup>, Максимович Н.Г.<sup>1</sup>, Хмурчик В.Т.<sup>1</sup>, Роговский Г.М.<sup>2</sup>, Биктимиров А.В.<sup>2</sup> <sup>1</sup>Естественно-научный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, demenevartem@gmail.com <sup>2</sup>OOO «Лаборатория неразрушающего контроля, Пермь, info@loggers.ru

Аннотация. Для улучшения экологической обстановки на территориях, где прослеживается загрязнение нефтепродуктами, требуется постоянное развитие и повышение эффективности проводимых природоохранных мероприятий. В рамках настоящих исследований опробован разработанный комплекс очистки подземных вод от растворенных нефтепродуктов с использованием биотехнологических методов и эмиттеров для дозированной подачи кислорода. По результатам исследований было установлено, что средняя степень очистки подземных вод при использовании предлагаемого комплекса составила 71.4 %, при этом на отдельных участках — более 95 %. Тенденция к снижению содержания загрязнителей сохранялась на протяжении всего эксперимента. Использование разработанной технологии возможно как самостоятельно, так и в дополнение к существующим методам, что позволит значительно улучшить общее экологическое состояние загрязненных территорий.

**Ключевые слова:** подземные воды, растворенные нефтепродукты, биоремедиация, эмиттеры, кислород.

**Abstract.** Improving the environmental conditions in oil-contaminated areas requires constant development and increased efficiency of environmental protection measures. Within the framework of studies, the complex for the cleaning of groundwater from dissolved-phase of contamination using biotechnological methods and emitters for dosed oxygen supply was tested. According to the research results, it was revealed that the average degree of groundwater cleaning using the proposed complex was 71.4%, while in certain areas more than 95%. The downward trend in the content of contaminants persisted throughout the experiment. Applying the developed technology is possible, both independently and in addition to existing methods, which will significantly improve the overall environmental state of the contaminated areas.

Key words: groundwater, dissolved-phase contaminants (hydrocarbon), bioremediation, emitter, oxygen.

Повышение эффективности природоохранных мероприятий приводит к развитию и совершенствованию методов борьбы с загрязнением нефтью и нефтепродуктами. Ликвидация разливов нефти предусматривает выполнение комплекса задач, реализацию различных методов и использование технических средств [1–3]. Все методы по борьбе с нефтяным загрязнением, в целом, можно разделить на следующие группы: механические, физико-химические и биологические.

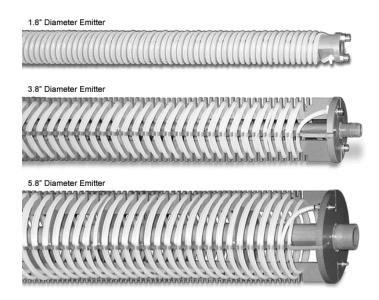
Биологическое разрушение нефтепродуктов является одним из наиболее эффективных при проведении природоохранных мероприятий. применяемых подходов И Преимущественно используется два подхода биодеградации углеводородов в окружающей среде: биостимуляция и биодополнение [4]. В основе метода биостимуляции лежит принцип создания оптимальных условий для развития естественной нефтеокисляющей микрофлоры, которое в условиях нефтяного загрязнения может быть ограничено низкой температурой, избыточной кислотностью, а также недостатком кислорода и других элементов (например, азота и фосфора), необходимых для микроорганизмов [5, 6]. Биодополнение может использоваться как отдельный подход, однако так же часто применяется совместно с биостимуляцией [7].

Очистка от нефтяного загрязнения может происходить *ex situ*, т.е. на специальных полигонах [8, 9], и *in situ*, т.е. прямо на месте загрязнения [10]. Применение *in situ* методов может быть значительно эффективнее по сравнению с методами, требующими извлечения и транспортировки загрязненных компонентов.

В настоящей работе рассматривался вопрос о возможности очистки подземных вод *in situ* от растворенных углеводородов с применением биостимуляции и биодополнения. В качестве стимулирующих добавок в подземные воды вносился кислород с использованием эмиттеров «Waterloo» (рисунок). Эмиттеры «Waterloo» были успешно применены для

стимулирования роста нефтеокисляющих микроорганизмов [11, 12]. Для биодополнения использовали нативные штаммы нефтеокисляющих микроорганизмов, выделенные из грунтов и подземных вод участка загрязнения.

#### Model 703 Waterloo Emitters



Типоразмеры эмиттеров, используемые для подачи реагентов в подземные воды.

Испытание технологии проводилось на участке загрязнения подземных вод растворенными нефтепродуктами в районе нефтеперерабатывающего предприятия. Изначально до работы системы по очистке подземных вод среднее содержание растворенных нефтепродуктов составляло  $4.06~{\rm Mr/дm^3}$  (на отдельных участках более  $17~{\rm Mr/дm^3}$ ). Экспериментальные работы выполнялись в течение  $90~{\rm дней}$ , однако система очистки подземных вод продолжает функционировать и в настоящее время.

В ходе исследований проводился систематический мониторинг, направленный на определение эффективности очистки подземных вод, а также на общую оценку условий на территории исследований. Осуществлялся контроль за следующими параметрами подземных вод: уровнем, рН, TDS, температурой и удельной электрической проводимостью, растворенными нефтепродуктами, растворенным кислородом, а также проводился общий химический анализ. В качестве контроля был произведен отбор проб воды до начала функционирования системы очистки.

По результатам наблюдений установлено, что начальная средняя концентрация растворенного кислорода в исследуемых водах составляла около  $1.42~\rm Mг/д M^3$ . На 10-й день эксперимента после установки системы эмиттеров отмечен рост концентрации растворенного кислорода до  $35.4~\rm Mr/д M^3$ , впоследствии также поддерживалось повышенное насыщение  $O_2$  для эффективной деструкции углеводородных загрязнений.

При контроле за изменением концентрации растворенных нефтепродуктов на опытном участке установлено, что на момент окончания экспериментальных работ средняя концентрация растворенных нефтепродуктов в зоне очистки составила 1.16 мг/дм<sup>3</sup>, т. е. степень очистки подземных вод достигла 71.4 %, на отдельных участках удалось добиться очистки подземных вод более 95 %. При этом стоит отметить, что тенденция к снижению содержания загрязнителей на участке сохранялась на протяжении всего эксперимента.

Полученные результаты в ходе испытаний технологии подтверждают эффективность предлагаемого способа очистки подземных вод от растворенных нефтепродуктов. Процесс насыщения воды кислородом и очистки от углеводородов наблюдался на всем протяжении опытных испытаний. Использование разработанной технологии самостоятельно или в дополнение к существующим методам позволит значительно улучшить общее экологическое

состояние загрязненных территорий и в целом повысить эффективность проводимых природоохранных мероприятий.

#### Список литаратуры

- 1. Давыдова С.Л., Тагасов В.И. Нефть и нефтепродукты в окружающей среде. М.: Изд-во РУДН, 2004. 163 с.
- 2. Оборин А.А., Хмурчик В.Т., Иларионов С.А., Маркарова М.Ю., Назаров А.В. Нефтезагрязненные биогеоценозы (процессы образования, научные основы восстановления, медико-экологические проблемы). Пермь: Изд-во УрО РАН, 2008. 511 с.
- 3. Пряничникова В.В. Электрохимический способ ликвидации последствий нефтяного загрячзнения грунтов: Дис... канд. техн. наук. Уфа, 2018. 162 с.
- 4. Foght J.M., Westlake D.W.S. Bioremediation of oil spills // Spill Technol Newslett. 1992. V. 17, Iss. 3. P. 1–10.
- 5. Коронелли Т.В. Принципы и методы интенсификации биологического разрушения углеводородов в окружающей среде // Прикладная биохимия и микробиология. 1996. Т. 32, № 6. С. 579–585.
- 6. Atlas R.M. Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbons: an Environmental Perspective // Microbial Rev. 1981. V. 45, Iss. 1. P. 180–209.
- 7. Kaiser J.-P., Bollag J.-M. Microbial activity in the terrestrial subsurface // Experientia. 1990. V. 46. P. 797–806.
- 8. US Environmental Protection Agency. Cost analyses for selected groundwater cleanup projects: Pump and treat systems and permeable reactive barriers // US EPA. 2001, EPA 542/R-00/013. 23 p.
- 9. US Environmental Protection Agency. Cost-effective design of pump and treat systems // US EPA. 2005. EPA 542/R-05/008. 38 p.
- 10. Nwachukwu M.A. Prospective techniques for in-situ treatment and protection of aquifers: A sustainable hydrology review // International Journal of Water Res Environ Eng. 2014. V. 6, Iss. 4. P. 131–143.
- 11. Robertson W.D., Cherry J.A. Long term performance of the Waterloo denitrification barrier // International Containment Technology Conference proceedings. 1997. P. 691–696.
- 12. Wilson R.D., Mackay D.M. Arrays of unpumped wells: an alternative to permeable walls for in situ treatment // International Containment Technology Conference proceedings. 1997. P. 888–894.

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ИСТОЧНИКИ ПОДТОПЛЕНИЯ ЛЕТНОГО ПОЛЯ ЧИТИНСКОГО АЭРОПОРТА «КАДАЛА»

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-466-470

Замана Л.В., Усманов М.Т., Борзенко С.В., Федоров И.А., Усманова Л.И., Аскаров Ш.А., Цыренжапов С.В.

Институт природных ресурсов, экологии и криологии CO PAH, Чита, l.v.zamana@mail.ru

Аннотация. По данным кустовой откачки способами временного и площадного прослеживания метода Тейса—Джейкоба определены коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности для расчета осушения участка подтопления летного поля аэропорта, вызванного разгрузкой напорных подземных вод, обусловленной инфильтрационными потерями из гидрозолоотвала Читинской ТЭЦ-1. Осушение может достигаться откачкой из одной скважины, удаленной от взлетной полосы на 80–90 м.

Ключевые слова: подтопление, подземные воды, водопроводимость, пьезопроводность, дренаж.

**Abstract.** According to the cluster pumping data, using the methods of time and area tracking of the Theiss-Jacob method, the coefficients of water conductivity and piezoelectricity were determined for calculating the drainage of the flooding area of the airport airfield caused by unloading of pressurized groundwater caused by infiltration losses from the ash dump of Chita TPP-1. Drainage can be achieved by pumping from one well, located 80-90 m away from the runway.

Key words: flooding, groundwater, water conductivity, piezoelectricity, drainage.

В юго-восточной части летного поля (ЛП) аэропортового комплекса «Кадала» (г. Чита) существует переувлажненный участок, водное питание которого обусловлено разгрузкой подземных вод. Для снижения их уровня согласно существующим нормативным требованиям до глубины не менее 1.5 м от поверхности земли с обеих сторон взлетно-посадочной полосы и рулежной дорожки сооружена система горизонтального дренажа. В связи с предстоящей реконструкцией аэропортового комплекса в 2020 г. ИПРЭК СО РАН по инициативе АО «АэроЧита» (г. Чита) и АО «Новая авиация» (г. С.-Петербург) выполнил гидрогеологические исследования с целью разработки рекомендаций по дальнейшей инженерной защите территории от подтопления. Основными задачами исследований было определение источников подтопления и гидродинамических параметров водоносного комплекса, разгрузка вод которого вызывает переувлажнение участка.

Подтопление ЛП впервые отмечено в конце 1973 г. после введения в эксплуатацию в марте того же года нового гидрозолоотвала (ГЗО) Читинской ТЭЦ-1 (в ту пору Читинской ГРЭС). Для выяснения причин и источников подтопления в 1976—1977 гг. на площади между золоотвалом и летным полем проведены гидрогеологические исследования с комплексом геофизических, буровых, опытно-фильтрационных и химико-аналитических работ [1]. В результате анализа полученных материалов авторы пришли к выводу, что подтопление происходит из-за подъема уровня подземных вод вследствие инфильтрации из отстойника золоотвала и выхода их через древний очаг разгрузки, сформировавшийся задолго до строительства аэропортового комплекса, а напорный характер вод обусловлен подпором подземного потока перегораживающим островом многолетнемерзлых пород.

ГЗО ТЭЦ-1 и аэропортовый комплекс «Кадала» расположены на северно-западном фланге Читино-Ингодинской межгорной впадины на расстоянии около 3 км друг от друга с превышением золоотвала на 30–35 м. Впадина выполнена нижнемеловыми терригенными осадками доронинской свиты, перекрытыми в долине р. Кадалинка (рис. 1) маломощным (до 10 м) верхнечетвертичным и современным аллювием. Кроме аллювиального водоносного горизонта подземные воды представлены двумя водоносными комплексами в осадочных породах и трещинно-жильными водами зон разломов.

Подземные воды доронинской свиты разделены на водоносные комплексы верхней угольной и нижней безугольной толщ [1]. Первая распространена в западной части территории аэропортового комплекса, вторая — до оз. Кенон, включая летное поле. Водовмещающие породы последней представлены песчаниками, чередующимися с водоупорными алевролитами и аргиллитами. Воды толщи вскрыты скважинами на глубинах

16.9-29.0 м, местами имеют слабый напор (1.2–7.9 м), их статические уровни устанавливаются на глубинах 16.9-25.8 м. Водообильность пород характеризуется удельными дебитами скважин преимущественно 0.5-2.0 л/с, редко 3.6-4.0 л/с. Коэффициенты фильтрации от 2.3 до 17.1 м/сут, коэффициенты водопроводимости 48.4-675.0 м²/сут, пьезопроводности  $-8.5\cdot10^3-3.9\cdot10^5$  м²/сут.

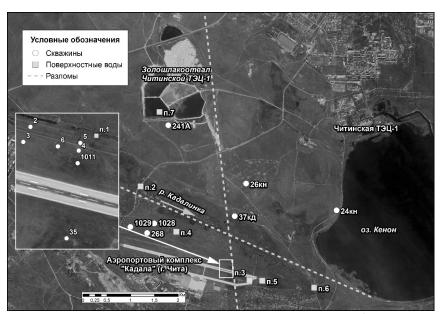


Рис. 1. Схема расположения пунктов гидрогеохимического опробования и опытного куста (врезка).

Трещинно-жильные воды распространены по [1] в бортах долины р. Кадалинка, где обводненные разломы ограничивают ее с юга и севера и в центральной части долины. Они вскрыты скважинами на глубинах 16.7–27.5 м в прибортовой и 5–9 м в центральной части долины. Воды напорные, их статические уровни находятся выше поверхности земли на 0.2–1.4 м, максимум 6.25 м. Водообильность разломов высокая. Дебиты двух скважин составляли 8.5 и 10.2 л/с при понижениях 3.12 и 3.46 м, а двух разведочно-эксплуатационных скважин у левого борта долины (одна из них – скв. 37кд, рис. 1) при групповой 15-ти суточной откачке – 49.2 и 55.5 л/с при понижениях 5.2 и 8.13 м. Значения коэффициентов водопроводимости в зонах разломов определены в пределах 209–430 м²/сут.

В 1990—1992 гг. для уточнения исходных данных для проектирования осушения ЛП проведено дополнительное изучение гидрогеологических условий района аэропортового комплекса «Кадала» [2], в этот раз работы в основном были сосредоточены на территории летного поля. Водообильность пород доронинской свиты оценена как невысокая, дебиты скважин не превышали 6 л/с при понижениях до 10 м. Коэффициенты фильтрации по данным откачек из скважин изменялись в диапазоне 0.65—17.0 м/сут. Обводненность пород в зонах разломов выше. Так, дебиты скважин 1011 и 35 (рис. 1, врезка), пробуренных на участке переувлажнения, составляли 9.5 и 28.0 л/с при понижениях соответственно 13.03 и 4.38 м и статических уровнях +1.70 и +1.50 м. Рассчитанные коэффициенты водопроводимости по этим скважинам составили 118.4 и 382.0 м²/сут. Тектоническим нарушениям отведена доминирующая роль в инфильтрации вод из гидрозолоотвала, движении их в сторону оз. Кенон и аэропортового комплекса и разгрузке на летном поле. Ширина зоны подтопления летного поля, как и в [1], принята в 270 м.

Для определения гидродинамических параметров в рамках соглашения в 2020 г. пробурено пять скважин, три из них глубиной по 50 м и две по 35 м. Для выбора мест их заложения предварительно выполнены электроразведочные работы методом электротомографии, который ранее применялся для выявления путей миграции вод из золоотвала [3]. Подземные воды вскрыты скважинами на глубинах 18.0–18.8 м в слое

дезинтегрированных песчаников мощностью 10.5–19.1 м, залегающих в толще аргиллитов и алевролитов. Опытно-фильтрационные работы ограничились кустовой откачкой из скважины 4 с наблюдательными скважинами № 5, 6, 2 и 3 (рис. 1, врезка). Расстояния от центральной до наблюдательных скважин в перечисленном порядке 25.7, 61.5, 156 и 165 м. Пьезометрические уровни по скважинам установились выше поверхности земли и составляли (м): № 4 – 1.02 м, № 5 – 0.98, № 6 – 0.77, № 2 – 0.47 и № 3 – 0.50. Откачка проведена на две ступени продолжительностью 24 и 23 ч с остановкой на 1 ч для смены глубины загрузки смесителя. Стабильный дебит при среднем значении 3.56 л/с (307.6 м³/сут) наблюдался на первой ступени в период замеров с 6.5 до 19.0 часов от начала откачки, понижение по центральной скважине за это время выросло с 0.80 до 1.28 м. На второй ступени дебит колебался в интервале 3.68–7.10 л/с при среднем по всем замерам 5.57 л/с, стабилизация его не наступила. В наблюдательных скважинах понижения уровней к концу первой ступени изменялись в пределах 0.98–0.57 м, а к концу второй — 1.22–0.74 м при понижении в центральной 1.30 и 1.57 м к концу каждой ступени.

Расчет параметров (коэффициентов водопроводимости *km* и пьезопроводности *a*) выполнен по способам временного и площадного прослеживания понижения уровня подземных вод по методу Тейса—Джейкоба [4]. Обработка данных наблюдений по способу временного прослеживания производится с помощью полулогарифмической прямой вида:

$$S = A_t + C_t \lg t$$
 при  $r = \text{const}$ ,

где  $C_t$  — угловой коэффициент и  $A_t$  — начальная ордината временных графиков прослеживания  $S-lg\ t$  (рис. 2). Начальная ордината  $A_t$  — это отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат (S) при  $lg\ t=0$ . Угловой коэффициент графика временного прослеживания определяется отношением  $C_t=(S_2-S_I)\ /\ (lg\ t_2-lg\ t_I)$ . Условием расчета параметров A и C по методу Тейса-Джейкоба является квазистационарный режим откачки с устойчивым дебитом.

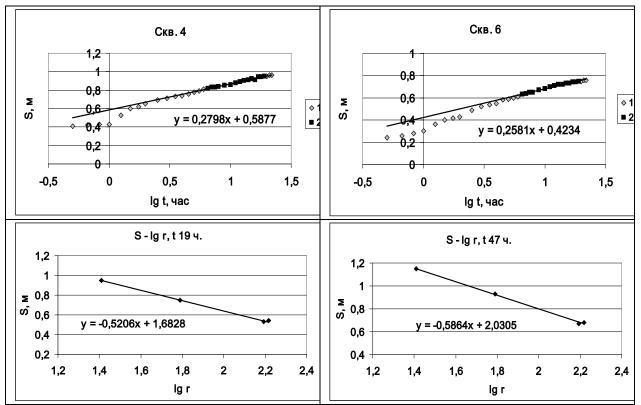


Рис. 2. Графики временного (верхний ряд) и площадного (нижний ряд) прослеживания понижения уровня в скважинах при откачке из скв. 4. Режим откачки: I — неустановившийся, 2 — квазистационарный.

Расчетные параметры вычисляют по формулам:

 $km = 0.183Q/C_t$  и  $lg\ a = 2\ lg\ r - 0.35 + A_t/C_t$ , где Q – дебит скважины, м $^3$ /сут, r – диаметр скважины или расстояние от центральной до наблюдательной скважины, м. При построении графика t принимается в часах.

Поскольку на второй ступени стабилизация дебита не произошла, расчеты по временному прослеживанию выполнены только по наблюдениям на первой ступени. На графиках временного прослеживания (рис. 2)  $C_t$  – коэффициент при x,  $A_t$  – свободный член уравнения. По центральной и ближайшей к ней наблюдательной скважине 5 коэффициенты  $A_t$  и  $C_t$  оказались одинаковыми (таблица).

Гидродинамические параметры водоносного комплекса безугольной толщи доронинской свиты на юго-восточном участке летного поля, рассчитанные по графикам временного прослеживания  $S-\lg t$ 

Параметры	Скважины							
	4	5	6	2	3			
$C_t$	0.2798	0.2798	0.2581	0.2498	0.3246			
$A_t$	0.5877	0.5877	0.4234	0.223	0.1282			
$km$ , $M^2/cyT$ .	201.2	201.2	218.1	225.3	173.4			
$a$ , $M^2/cyT$ .	0.55	37179	73820	90550	30190			

Способ площадного прослеживания заключается в определении зависимости понижения уровня воды в наблюдательных скважинах от их расстояния от центральной (r). Коэффициенты водопроводимости и пьезопроводности также рассчитываются по угловым коэффициентам  $C_r$  и начальным ординатам  $A_r$  на графиках прослеживания  $S-lg\ r$  при одновременных замерах уровня в наблюдательных скважинах (рис. 2). К концу откачки сохранялась линейная зависимость между S и  $lg\ r$ , поэтому для расчета параметров включены и данные по второй ступени. Значения  $C_r$  и  $A_r$  находят, как и по уравнениям временного прослеживания. Расчетные формулы гидродинамических параметров имеют вид:  $km = -0.366Q\ / C_r$  и  $lg\ a = 2A_r\ / (-C_r) - 0.35 - lg\ t$ .

Гидродинамические параметры рассчитаны по пяти замерам в интервале времени от 13 до 47 ч от начала откачки. Значения km изменялись в диапазоне 213.2–270.1 м<sup>2</sup>/сут, a – от 53730 до 94070 м<sup>2</sup>/сут, а величина радиуса влияния R – от 1663 до 2902 м.

Средние значения km по замерам на первой ступени откачки составили  $219.7 \text{ м}^2/\text{сут}$ , совместно со второй ступенью —  $238.8 \text{ m}^2/\text{сут}$ , коэффициента пьезопроводности  $a-8.11\cdot10^4$  и  $7.54\cdot10^4 \text{ м}^2/\text{сут}$  соответственно. В целом рассчитанные двумя способами значения гидродинамических параметров имеют хорошую сходимость. Величина отклонения по отношению разницы и суммы средних значений по двум способам расчета равна 3.75 % по km и 16.7 % по a.

Для осушения участка подтопления в [2] предложено два варианта дренажа: 1) горизонтальный — траншеями глубиной 4.0—4.5 м по обе стороны взлетно-посадочной полосы (ВПП) в 10 м от ее кромок; 2) комбинированный — с двумя скважинами в каждой траншее, если горизонтальный дренаж не обеспечит снижения уровня воды под полосой на 1.5 м от поверхности земли. Наш расчет по полученному значению km показал, что при радиусе влияния 3000 м и понижении уровня воды 15 м в скважине, удаленной от ВПП на 80—90 м и расположенной вблизи местоположения скв. 4, понижение под полосой не менее 1.5 м достигается на всем протяжении участка подтопления (до 300 м).

Предварительно по формуле Дюпюи  $Q = 2\pi kmS/ln\ R/r$  [5] находили дебит скважины при нескольких значениях понижения S. Затем методом подбора по полученным значениям Q по преобразованной относительно S формуле определяли величину понижения на удалении r от скважины. Оказалось, что при понижении в скважине 15 м понижение под взлетной полосой в  $\geq$ 3.0 м или минимум 1.5 м от дневной поверхности (при статическом уровне  $\pm$ 1.5 м) достигнет протяженности около 700 м, что перекроет всю зону подтопления. Расчетный дебит скважины при этом равен 23 л/с или 1988 м³/сут.

Радиус влияния откачки R для расчета дебита скважины обычно определяют по уравнению Зихарда R=10S  $\sqrt{k}$  (здесь k — коэффициент фильтрации, м/сут), дающему заниженную величину [5]. Реальность принятой нами величины R подтверждается его значениями, приведенными в табл. 2. Они получены из зависимости  $S=f(\lg r)$  на графиках площадного прослеживания. При нулевом понижении на границе воронки депрессии (S=0) уравнение приобретает вид  $\lg r = A_r / (-C_r)$  или  $\lg r = A_r / |C_r|$ .

В качестве одного из доказательств влияния золоотвала на подтопления ЛП в [1] и [2] использовали данные по содержанию в трещинно-жильных водах сульфатов. От золоотвала, в пруду которого концентрации сульфат-иона в воде были 500-800 мг/дм<sup>3</sup>, линейновытянутый ореол его через летное поле уходил далее к югу в сторону основной дрены артезианского бассейна – р. Ингода. Устойчивый характер ореола сульфатов подтверждают результаты последующих исследований [6-8 и др.]. Основная доля инфильтрационного потока перехватывается разломами в левом борту и долине р. Кадалинка, разгрузка по данным гидрометрических измерений достигает 100 л/с [1]. В результате содержание  $SO_4^{2-}$  в речной воде на нижнем отрезке русла реки в меженный период достигает 500 мг/дм<sup>3</sup> и более. Максимальная концентрация сульфат-иона в 563 мг/дм<sup>3</sup> приведена в [9]. В пробах, отобранных 25.06.2020 г., в точке п. 6 (см. рис. 1) концентрация сульфата была 233.5 мг/дм<sup>3</sup> против 28.4 мг/дм $^3$  в п. 2. На ту же дату в воде скв. 37кд содержание его было 625 мг/дм $^3$ , а в воде отстойника золоотвала (п. 7, см. рис. 1) -783 мг/дм<sup>3</sup>. В пробах из скважин 2 и 3 сульфат-ион установлен в концентрациях 249.6 и 192 мг/дм<sup>3</sup>, а по центральной скв. 4 его содержание выросло с 230.4 мг/дм<sup>3</sup> перед началом откачки до 254.4 мг/дм<sup>3</sup> к ее концу. К западу от зоны напорных вод по скв. 268 и 1028 (см. рис. 1) концентрации  $SO_4^{2-}$  были 50.5- $51.3 \text{ мг/дм}^3$ .

Таким образом, наши данные по сульфатам подтверждают выводы предшествующих исследований об участии инфильтрационных утечек из золотвала в подтоплении летного поля аэропорта. Полученные значения гидродинамических параметров позволяют выполнить расчеты различных вариантов осушения участка его подтопления. Предложена формула для расчета радиуса влияния откачки по параметрам графика площадного прослеживания.

- 1. Коросталёва А.Я., Цыганок В.И., Молчанов Н.А., Ланда В.Е. Отчет о гидрогеологических исследованиях по установлению причин подтопления Читинской ГРЭС и аэропорта. Отчет Договорной партии за 1976—1977 г. Т. 1 текст и текстовые приложения. Чита: ЧГУ, 1978. 64 с. (Забайкальский филиал ФБУ ТФГИ по ДФО).
- 2. Карпов В.В., Бахлов А.Е. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия района Читинского аэропорта. Отчет Читинской партии по работам 1990–1992 гг. Чита: ГГП Читагеология, Западное ГГП. 1992. 95 с. (Забайкальский филиал ФБУ ТФГИ по ДФО).
- 3. Оленченко В.В., Усманов М.Т., Усманова Л.И., Цыренжапов С.В. Выявление путей миграции техногенных вод из гидротехнических сооружений методом электротомографии (на примере золоотвала Читинской ТЭЦ-1) // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 1. С. 101–105.
- 4. Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1979. 326 с.
- 5. Скабалланович И.А. Гидрогеологические расчеты по динамике подземных вод. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Госгортехиздат, 1960. 407 с.
- 6. Замана Л.В., Усманова Л.И., Усманов М.Т. Гидрохимия отстойника золоотвала Читинской ТЭЦ-1 и подземных вод в зоне его инфильтрационного влияния // Вестник Бурятского гос. университета. 2010. Вып. 3: Химия, физика. С. 28–33.
- 7. Усманова Л.И., Замана Л.В., Усманов М.Т. Геохимия подземных и поверхностных вод в зоне влияния гидрозолоотвала Читинской ТЭЦ-1 // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы третьей Всероссийской конференции с международным участием / Отв. ред. Л.В. Замана, С.Л. Шварцев. 2018. С. 379–382. DOI: 10.31554/978-5-7925-0536-0-2018-379-382.
- 8. Усманова Л.И. Гидрогеохимическая характеристика вод зоны влияния гидрозолоотвала Читинской ТЭЦ-1 // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 166–172.
- 9. Цыбекмитова Г.Ц. Качество фильтрационных вод золошлакоотвала ТЭЦ-1 и возможные пути их поступления в оз. Кенон (Забайкальский край) // Вода: химия и экология. 2016. № 2. С. 11–17.

### ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ КАК ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫЙ РЕСУРС

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-471-473

Зелинская Е.В., Первойкин М.В.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, zelinskaelena@mail.ru

**Аннотация.** В настоящей статье рассмотрены результаты разработки нового подхода к изучению и оценке высокоминерализованных вод как техногенного минерально-сырьевого ресурса. Показано, что учет комплекса экономических, экологических и социальных факторов при оценке потенциала подземных рассолов позволяет обосновать перспективность и экономическую эффективность их добычи и использования в составе техногенных месторождений гидроминерального сырья либо попутно вскрывающихся вод рассольной минерализации при разработке месторождений твердых полезных ископаемых и углеводородов.

Ключевые слова: рассолы, природно-техногенные системы, ресурсы подземных вод.

**Abstract:** This article discusses the results of the development of a new approach to the study and assessment of highly mineralized waters as a technogenic mineral resource. It is shown that taking into account a complex of economic, environmental and social factors in assessing the potential of underground brines makes it possible to substantiate the prospects and economic efficiency of their extraction and use in the composition of technogenic deposits of hydromineral raw materials or incidentally opening waters of brine mineralization in the development of deposits of solid minerals and hydrocarbons.

Key words: brines, natural and technogenic systems, groundwater resources.

Объективными предпосылками вовлечения в производственный оборот техногенных образований являются:

- требование сохранения природно-ресурсного потенциала, что обеспечивается сокращением добычи первичных минерально-сырьевых ресурсов и снижением объема наносимого окружающей среде ущерба;
- необходимость замены первичных ресурсов вторичными, что обусловлено потребностями производства в материально-сырьевых ресурсах, в том числе тех отраслей, природносырьевая база которых практически исчерпана;
- возможность использования техногенных отходов, что обеспечивается внедрением достижений научно-технического прогресса.

Уникальным и весьма интересным примером с этой точки зрения являются поликомпонентные подземные воды рассольной минерализации, вскрывающиеся при разработке месторождения нефти, газа и твердых полезных ископаемых, в частности, на территории Сибирской геологической платформы и представляющие собой особый вид гидроминерального сырья [1]. Применительно к гидроминеральным ресурсам решение проблемы выглядит следующим образом: выработать подход и критерии для разработки технологий, которые могли бы наиболее эффективно и полно использовать полезные свойства, заключенные в гидроминеральных ресурсах, а именно подземных рассолах. Это является многофакторной проблемой. Системный подход вызывает необходимость учитывать взаимосвязь производственных (в частности, технологических), экономических, социальных и природных процессов для повышения доступности этого вида ресурсов.

Термин «доступности» мы определяем, с одной стороны, потенциалом (полезности), заключенным в самом ресурсе с точки зрения возможности реализовать эту «полезность». С другой стороны, доступность определяется научным, техническим и технологическим уровнем развития общества, производства и недродопользователей. Важно наличие экономических, социальных и правовых условий для возможности реализовать этот потенциал.

Путей повышения уровня «доступности» ресурсов подземных вод несколько. С технической точки зрения — это разработка техники и технологий, позволяющих добывать и перерабатывать их более полно и комплексно, снижение потерь, то есть повышение эффективности использования. Это одновременно и повышение экономической доступности, которое связано также с реализацией в условиях рыночных отношений

глобальной стратегической проблемы стабильности функционирования экономики за счет диверсификации, то есть вложения капитала в комплексное освоение месторождений и вовлечения в переработку новых видов ресурсов, в том числе попутного гидроминерального сырья. Это очень важно для современной экономической ситуации России.

Наличие в течение длительного периода времени нового природно-техногенного типа ресурсов — попутно вскрывающихся рассолов (первоосновой которого является природносырьевой ресурс — подземные природные рассолы) — приводит к необходимости учета факта его существования при анализе функционирования экологической системы и ее свойств. Важным становится вопрос, как можно использовать вновь приобретенные свойства. Необходимо сначала их выявить и сделать доступными для пользования. Возможность использования свойств попутных рассолов либо вообще не реализуется, либо приводит к отрицательным результатам. Выявление внутренних взаимосвязей в новой системе, установление возможностей их использования и реализация этих возможностей — весьма актуальная методологическая и практическая задача.

С точки зрения практического решения необходима нейтрализация отрицательного влияния нового элемента природно-техногенной системы на ее другие составляющие, так как оно имеет тенденцию накапливаться и приводить к необратимым последствиям (нарушение устойчивости экосистемы, ее деградация и т.д.). С другой стороны, меры по предотвращению либо устранению этого вредного воздействия могут привести к еще более серьезным отрицательным последствиям. Таким образом, с методологической точки зрения сначала необходимо выяснить, установить законы функционирования новой природнотехногенной системы, а потом уже предпринимать практические шаги. Однако когда влияние резко отрицательное, как в случае с попутно вскрывающимися рассолами, необходимо предпринимать ответные меры, пытаясь одновременно выявить присущие системе взаимосвязи и закономерности.

Эти обстоятельства требуют решения вопроса изоляции подземных рассолов. Было предложено несколько вариантов мероприятий по утилизации подземных вод, обводняющих различные месторождения твердых полезных ископаемых [2]. Вариант обратной закачки рассолов не оправдывает себя в полной мере, поскольку происходит их возврат в открытые и подземные горные выработки. К тому же, на наш взгляд, он бесперспективен вследствие другого недостатка — неиспользования возможности получения дополнительной продукции из подземных рассолов. По другому варианту предлагаются технологии опреснения соленых вод и рассолов. Предусматривается подавать рассолы на опреснительную установку для получения товарной соли хлорида натрия и пресной воды. Предусматривается сохранение участка обратной закачки соленых вод и рассолов как резервный вариант на случай выхода из строя установки опреснения рассолов и ее ремонта, позволяющий исключить тяжелые экологические последствия. Существенным недостатком данного варианта, на наш взгляд, является временное решение проблемы: согласно миграционным прогнозам даже при резервной закачке стоки могут снова попадать в горные выработки [3]. Другой недостаток — также неиспользование возможности утилизации микрокомпонентов рассолов.

Вариант сброса дренажных и откачиваемых с горизонтов вод в близлежащие водоемы – наихудший. Все отрицательные последствия этого решения уже рассмотрены многими авторами [4].

На наш взгляд, наиболее перспективным является вариант вовлечения рассолов в переработку [5–7]. Технологически это возможно, так как уже давно обоснована возможность раздельного отбора пресных, соленых вод и рассолов либо извлечения ценных компонентов из всего объема минерализованных вод [2, 8]. Преимущества этого варианта заключаются в возможности использования техногенных вод, что существенно снизит вредное воздействие на окружающую среду, и в получении дополнительной товарной продукции [5–9]. Кроме того, данный вариант позволит использовать полученные в результате переработки опресненные воды в водообороте горных предприятий ГОКа и соответственно снизить расходы чистой воды.

Таким образом, одним из путей, предотвращающих превращение природно-сырьевой системы в природно-техногенную, является комплексное использование ее элементов, что позволяет предотвратить вредное воздействие отходов. Важно в этой связи извлечение растворенных компонентов из попутных вод и рассолов с целью возможного оборотного использования жидкой фазы и утилизации извлекаемых веществ. К сожалению, современный уровень технологии не всегда позволяет добиться этого, и поэтому мы имеем природно-техногенные системы.

Возможность, целесообразность и эффективность решений, направленных на комплексное использование подземных рассолов, требуют всесторонней оценки этого особого вида ресурсов и предлагаемых способов повышения их доступности.

Возможность вовлечения рассолов в промышленную переработку с целью извлечения ценных компонентов, несмотря на очевидность их высокой ценности, в каждом конкретном случае должна быть обоснована эколого-экономической эффективностью данного производства. Для этого необходимо выработать методологию данного анализа, так как вследствие двойственности присущих рассолам свойств до сих пор не выработана корректная позиция, касающаяся их оценки.

Разработка методологических основ анализа технологических решений и схем должна строиться на основе удовлетворения экономических, экологических и технологических требований.

Схема технологической переработки рассолов зависит от их состава и свойств. Вопрос об их комплексной переработке должен быть решен на основе детального анализа состава, физических, структурно-химических, термодинамических свойств рассолов, ресурсной оценки месторождений и проявлений подземных вод, показателей кондиций и эффективности их переработки с целью хозяйственного использования.

Нами была разработана схема анализа месторождений и проявлений подземных вод с учетом экологических ограничений. На ее основе составлена база знаний, позволяющая получить информацию о месторождениях, уровне технологий добычи и переработки, оценить перспективность и наметить направления их совершенствования [10].

- 1. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and rocessing prospects // Applied Geochemistry. 2020. V. 117. P. 104588.
- 2. Состояние и перспективы комплексной утилизации ценных компонентов природных и техногенных минерализованных вод (Обзор ВИЭМС) // И.А. Клименко, С.А. Медведев, Ст.А. Медведев, В.М. Попов, М., 1981, 34 с.
- 3. Верхозин И.И. Геолого-экологические проблемы разработки Коршуновского месторождения // Труды международного симпозиума "Мирный-91". Удачный: НИЦ "Мастер", 1991. Т. 2. С. 89–91.
- 4. Ulanova O.V., Zelinskaya E.V., Fedotov K.V. Environmental background of the integrated processing of hydromineral resources (Экологические аспекты переработки гидроминеральных ресурсов) // IMPC 2018 29th International Mineral Processing Congress 29. Moscow, 2019. P. 3081–3085.
- 5. Zelinskaya E.V. Industrial waters as a perspective source of hydromineral raw materials // IMPC 2018 29th International Mineral Processing Congress 29. Moscow, 2019. P. 3003–3011.
- 6. Коцупало Н.П. История реализации технологии сорбционного извлечения лития из природных рассолов: от науки до производства. Изд-во Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2020. 107 с.
- 7. Рябцев А.Д., Коцупало Н.П., Менжерес Л.Т., Кураков А.А., Титаренко В.И. Научные основы производства селективного к литию сорбента и промышленной технологии извлечения хлорида лития из гидроминерального поликомпонентного сырья // Химическая технология. 2020. Т. 21, № 8. С. 338–352.
- 8. Уланов Н.М., Корчик Н.М., Рогов О.В. Селективное извлечение ценных компонентов из природных вод // Химия и технология воды. 2007. Т. 29, № 3. С. 19–20.
- 9. Шадрунова И.В., Зелинская Е.В., Волкова Н.А., Орехова Н.Н. Проблемы и перспективы освоения ресурсов гидроминерального сырья // Международное совещание «Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья» (Плаксинские чтения-2015), г. Иркутск, 2015. С. 39–44.
- 10. Recovery of mining waste in the complex development of mineral resources / Edited by V.A. Chanturia and I.V. Shadrunova. M.: Publishing house Sputnik, 2019. 120 p. ISBN 978-5-9973-5396-4.

## ВОДНО-МЕТАНОВЫЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ В ЮГО-ЗАПАДНОМ ПРЕДГОРЬЕ КОРЯКСКОГО ВУЛКАНА, КАМЧАТКА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-474-478

Кирюхин А.В.<sup>1</sup>, Воронин П.О.<sup>1</sup>, Журавлев Н.Б.<sup>1</sup>, Копылова Г.Н.<sup>2</sup> <sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, <sup>2</sup>Камчатский филиал Геофизической службы РАН, AVKiryukhin2@mail.ru

Аннотация. Кеткинские геотермальные резервуары являются продуктом инжекции магмы и воды из Корякского вулкана. Фактическое тепловое питание может осуществляться в результате инжекции магмы в виде силлов и даек в диапазоне глубин от –6 до –3 км абс. от ЮЗ сектора Корякского вулкана. Водное питание по изотопному составу воды смешанное: осуществляется через структуру Корякского вулкана с высоты более 2 км абс. и за счет магматических флюидов. Система выявленных продуктивных разломов и система магматического фракинга вулкана геометрически связаны. Скважина Е1 демонстрирует чувствительность изменения уровня воды к событиям магматического фракинга Корякского вулкана 2008–2009 гг.

Ключевые слова: геотермальный, фракинг, магма, резервуар, вулкан.

**Abstract.** The Ketkinsky geothermal reservoirs appears to be the product of magma and water injection from the Koryaksky volcano. Actual thermal supply may be carried out by magma injections in the form of sills in the depth range of -6 to -3 km abs. from the SW sector of the Koryaksky volcano. Water supply according to the isotopic composition of water is mixed: it is carried out through the structure of the Koryaksky volcano from above 2 km abs. and at the expense magmatic fluids. The system of the identified productive faults and magma fracking system is geometrically conjugated through some of the existing faults. Well E1 located above of the magma-hydrothermal connection above mentioned demonstrates water level change sensitivity to magma fracking events of Koryaksky volcano 2008-2009.

Keywords: geothermal, fracking, magma, reservoirs, volcanoes.

#### Введение

Авачинско-Корякский вулканогенный бассейн площадью 2530 км<sup>2</sup> включает пять четвертичных вулканов (два из которых – Авачинский (2750 м абс.) и Корякский 3456 (м абс.) – активны), суббассейны вулканогенно-осадочных неоген-четвертичных отложений мощностью до 1.4 км. Бассейн расположен в депрессии, сформированной в верхней части фундамента мелового возраста, характеризующейся низким температурным градиентом 24 °/км. Фундамент бассейна сложен верхнемеловыми отложениями К2, которые представлены метаморфическими породами с низкой пористостью и проницаемостью в целом, однако присутствуют локальные зоны трещиноватости, из которых при испытании скважин получены притоки воды с дебитом до 6 кг/с в интервале глубин 1438-1490 м (скв. Е1) [1]. Средняя теплопроводность пород мелового возраста составляет 2.8 Вт/м/°С. Неогеннижнечетвертичный водоносный комплекс сложен пирокластическими и вулканогенноосадочными образованиями. Значения пористости довольно высокие: 0.36-0.48, удельные дебиты скважин до 0.01 л/с (скв. ГК-1, Пиначевская). Водоносный комплекс Пиначевского экструзивного массива  $Q_{1-2}$  сложен экструзиями андезитов и риолитов и включает жерловые образования андезитов, дацитов и риолитов (мощность> 200-500 м). Вложенный артезианско-вулканогенный бассейн (АВБ) включает водоносный комплекс водноледниковых образований: голоценовые аллювиальные отложения, верхнеплейстоценморской аллювиально-морской горизонты, верхнеплейстоценовый голоценовый И ледниковый и водно-ледниковый комплекс, водоносный голоценовый пролювиальный и делювиально-пролювиальный комплекс. По данным опробования скважин Быстринского месторождения подземных вод диапазон проницаемости от 10 до 3000 мД. Корякский и Авачинский вулканы (Q<sub>3-4</sub>), сложенные андезибазальтами и базальтами, формируют область питания подземных вод вулканогенного бассейна [2].

По составу газа флюиды вулканического фундамента (за исключением северного склона Корякского вулкана) характеризуются повсеместным распределением метана (около 70 об. %), обнаруженного в скважинах Кеткинского геотермального месторождения, вдоль юго-восточной периферии Пиначевского экструзионного массива (скв. ГК1, Пиначевские

источники), к юго-западу от Корякского вулкана (скв. Е-1) и скважины в районе Радыгинской площади (скв. R3).

Известны естественные сбросы подземных вод с повышенной соленостью в районе Кеткинского геотермального поля — Зеленовские озерки юго-западнее Корякского вулкана [3]. Проведенные геоэлектрические исследования [4] выявили одну из изолированных высокопроводящих геофизических аномалий с высокой проводимостью — от 13 до 20 Ом⋅м в районе Зеленовских озерков с помощью бурения в 1986 г. Скважина 23, глубиной 341 м, вывела термальные воды на поверхность (расход самоизлива 9.3 л/с, температура воды на устье 57 °С, избыточное давление 0.73 атм.

#### Системы магматического фракинга в ЮЗ секторе Корякского вулкана

Основная часть инжекции магмы под Корякский вулкан произошла на глубинах -3.0... -5.5 км абс. у его юго-западного подножия на расстоянии менее 1.5-4.0 км от вершины (июль 2008 г. – январь 2009 г.). Дополнительный Frac-Digger анализ данных MEQ (данные КБ ГС РАН) с 01.2000 г. по 10.2019 г. с параметрами поиска ( $\delta t \le 30$  сут,  $\delta R \le 6$  км,  $\delta Z \leq 0.2$  km,  $N \ge 6$ ) выявил инжекции магмы (рис. 1, таблица). Этот комплекс включает одиннадцать даек/силов с углами падения менее 26° на глубинах от -6.0 до -3.2 км абс. (время этих событий август 2008 г. – август 2009 г.). Видимая длина в вертикальном разрезе до 4 км (силл № 49). Азимут падения некоторых из этих силлов ориентирован в северо-восточном направлении, что означает, что на их продолжении в сторону Кеткинского продуктивного геотермального резервуара могут формироваться проницаемые термовыводящие разломы при условии, что магматическая деятельность Корякского вулкана осуществляется в течение длительного геологического времени (от сотен до тысяч лет) в аналогичном геомеханическом режиме.

Pасчетные (Frac-Digger) пологие магматические инжекции (силлы/дайки) в юго-западном секторе Корякского вулкана

$N_{\underline{0}}$	Угол	Азимут	Абсолютная	Дата	Магнитуда	Количество
	падения (°)	падения (°)	отметка		Ml	микроземлетрясений
49	12.9	103.7	-4517	11.08.2008	1.8	12
60	17	2.7	-3352	30.09.2008	1.8	25
73	22.9	274.7	-4829	27.10.2008	1.45	7
76	15.1	147.1	-6000	31.10.2008	1.95	6
80	23.9	21.1	-3590	13.11.2008	1.9	20
85	22.9	51.1	-4300	27.11.2008	2.4	8
101	25.8	92	-3263	30.01.2009	1.45	9
123	19.6	36.4	-4084	22.03.2009	1.6	17
147	8.7	271.8	-5243	30.04.2009	1.65	15
159	19.6	142.2	-3295	24.05.2009	1.45	12
192	18.7	178.4	-3244	26.08.2009	1.55	8

#### Система продуктивных разломов Кеткинского резервуара

Для выявления продуктивных разломов была использована программа Frac-Digger2 [5, 6], позволяющая выявлять плоско ориентированные кластеры продуктивных зон в скважинах. Для выборки элементов плоско ориентированных кластеров используются следующие критерии: 1) близость к горизонтальной плоскости  $\delta R$ ; 2) ориентация близости к плоскости  $\delta Z$  (расстояние между элементом образца и плоскостью); 3) минимальное количество элементов в плоскоориентированном кластере N. В программе FRAC-Digger2 выборка из набора точек в трехмерной пространственно-временной области выполняется случайным образом (с использованием метода Монте-Карло). Это позволяет избежать зависимости решения от упорядоченности исходного набора точек по времени, что чрезвычайно важно для трехмерного анализа распределения продуктивных зон и выявления продуктивных разломов. При поиске К элементов из списка, состоящего из N элементов

максимальное количество уникальных генераций ограничено временем итерации, поэтому выполняется несколько запусков программы для подтверждения достоверности выявленных продуктивных разломов.

При расчетах продуктивных зон Кеткинского геотермального месторождения приняты следующие расчетные параметры:  $\delta R = 4$  км,  $\delta Z = 100$  м (50 м), N = 6. В качестве исходных данных использованы глубины вскрытий кровли продуктивных зон (по каталогу скважин Кеткинского геотермального поля с учетом отклонения скважин 4A и 8), всего 87 зон. В результате были выявлены три продуктивных разлома: угол их падения составил 76°, 77° и 24°, азимут падения  $38.1^{\circ},109.8^{\circ}$ и  $139.1^{\circ}$ , абсолютная отметка -641 м, -553 м и -680 м, площадь 1.76 км², 0.49 км² и 3.95 км², суммарная *продуктивность* 60.5 кг/с, 43.3 кг/с и 17.9 кг/с.

### Гидравлическая связь: Кеткинский геотермальный резервуар – система магматического фракинга Корякского вулкана

Теперь мы можем объединить информацию о системе фракинга магмы под Корякским вулканом с системой продуктивных разломов Кеткинского геотермального резервуара в единый трехмерный вид, где мы можем увидеть плоскость контакта между магматической и гидротермальной системами. Если плоскость продуктивного разлома № 3 будет продолжена на СВВ, то она пересечет плоскость пологого силла № 49 (таблица) (рис. 1), несмотря на то, что они находятся на расстоянии от 20 до 25 км друг от друга. Таким образом, возможна гидравлическая связь между продуктивными резервуарами Кеткинского геотермального месторождения и системой магматического фракинга Корякского вулкана.

### Чувствительность скважины Е-1 к событиям магматического фракинга

Скважина Е1 пробурена в 1984 г. на глубину 3003 м и после проведения геофизических и гидрогеохимических испытаний используется для режимных наблюдений в целях поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений. Она (Е1) расположена на расстоянии 17 км от вершины Корякского вулкана над зоной гидравлической связи между продуктивными резервуарами Кеткинского геоермального месторождения и системой магматического фракинга Корякского вулкана, показанной на рис. 1. По данным бурения в интервале 0–570 м выявлены четвертичные гравийно-галечные отложения, в интервале 570–665 м – туфы аланейской серии неогена (Na1). В зоне слабого водопритока на глубине 625–647 м была проведена перфорация обсадной колонны, при этом на глубине 665 м был сделан искусственный забой. Уровень воды в скважине установился на глубине около 28 м.

Подземные воды в интервале 625–647 м относятся к водам гидродинамической зоны затрудненного водообмена вследствие структурного положения толщи алнейских вулканитов. Газогидрохимические параметры подземных вод также указывают на относительно застойные условия их формирования. Во время бурения скважины в области распространения туфов алнейской серии на глубинах 570–1060 м был выполнен химический анализ растворенного в воде газа:  $N_2$  – 60 об. %,  $CH_4$  – 29 об. %,  $O_2$  – 10 об. %, Ar – 0.6 об. %,  $CO_2$  – 0.3 об. %,  $H_2$  – 0.2 об. %, тяжелые углеводороды (от  $C_2H_4$  до  $C_6H_{14}$ ) – 0.02 об. %,  $H_2$  – 0.006 об. % (данные Центральной химической лаборатории Института вулканологии ДВО РАН). Для полученного состава растворенного газа характерны избыточные концентрации метана и других углеводородных газов по сравнению с газом, растворенным в воде и находящимся в равновесии с атмосферным воздухом. Это свидетельствует о том, что в районе скважины в алнейских вулканитах происходит генерация или транспортировка газа азотно-углеводородного состава [7].

Изменения уровня воды в скважине E1, по-видимому, тесно синхронизированы со скоростью поступления магмы в питающую систему Корякского вулкана (рис. 2). Активация Корякского вулкана в 2008–2009 гг. сопровождалась повышением уровня воды в скважине E1 на 1.2 м.

Для оценки возможного вклада эффекта газлифта в наблюдаемые изменения уровня воды было выполнено изотермическое TOUGH2-EWASG моделирование. Использована геометрия одномерной модели: ствол скважины от устья до глубины 100 м представлен

вертикальной колонкой, состоящей из 100 элементов с высокими величинами проницаемости и пористости (1e-8 м², 0.99). В верхней части модели были заданы атмосферные условия работы скважины в режиме самоизвлива при постоянном давлении 1 бар (скважина глубиной 0.5 м с продуктивностью с PI = 1e-8 м² и P = 1 бар). В нижней части модели задан постоянный приток газа и воды (0.1 кг/с/м² газа и 0.00133 кг/с/м² воды) для условий гравитационного равновесия и двухлетнего цикла их вариаций от 0.02 до 0.18 кг/с/м² газа и от 2.66e-4 до 2.39e-3 кг/с/м² воды для переходного режима. Гравитационное равновесие в условиях положений уровня воды — 28 м было получено в модели до работы в переходных условиях в течение 20 лет. Результаты моделирования показывают реакцию уровня воды на циклический приток  $CH_4$  на глубине 100 м с амплитудой до 2 м. Это означает, что дополнительный приток  $CH_4$  2.5 г/с (3.5 л/с) обеспечивает повышение уровня воды на 1 м.

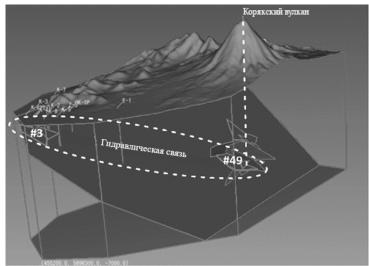


Рис. 1. Трехмерное изображение системы магматического фракинга (показаны только пологие силлы/дайки) под Корякским вулканом (таблица) и продуктивные разломы в Кеткинском геотермальном резервуаре.

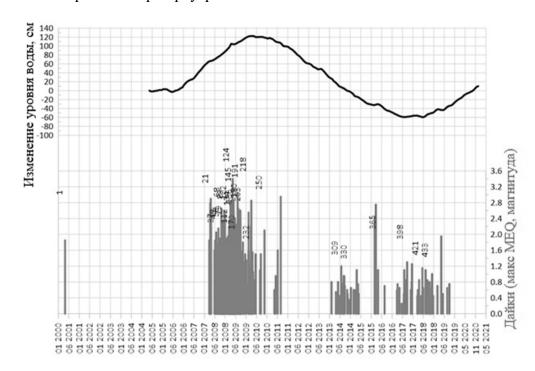


Рис. 2. Изменение уровня воды в скважине E1 (в см, с барометрической компенсацией) [7, 9] в зависимости от событий нагнетания магмы под Корякским вулканом http://www.gsras.ru/new/infres.

Таким образом, показано, что скважина Е-1 может быть чувствительной к процессам магматического фракинга в районе Корякского вулкана относительно повышения уровня воды при дегазации магмы и роста давления в ближайших геофлюидных резервуарах. Следует учитывать, что эффект газлифта не объясняет наблюдаемые понижения уровня воды с повышенной скоростью перед сильными землетрясениями в течение десятков суток. Такой процесс может происходить при увеличении емкости водоносных пород или при увеличении плотности подземной воды в водовмещающих породах и в стволе скважины при изменении фазового состояния газа [8].

#### Выводы

- 1. В диапазоне бурения скважинами на глубину 2.4 км ось термоаномалии опускается в направлении ЮВВ, при этом градиенты давления флюида и газосодержания СН<sub>4</sub> (термогенного происхождения) направлены в СВВ. Таким образом, Кеткинское геотермальное месторождение является продуктом закачки магмы и воды из Корякского вулкана.
- 2. Источником теплового питания могут быть инжекции магмы в виде силлов и даек в диапазоне глубин от -6 до -3 км абс. в юго-западном секторе Корякского вулкана и конвективный тепловой поток из вмещающих пород. Водное питание, судя по изотопному составу воды, смешанное: наблюдаются метеорные воды с возвышенностей Корякского вулкана и воды с магматической составляющей.
- 3. Корякско-Кеткинская магмогидротермальная взаимосвязь также подтверждается: во-первых, система выявленных продуктивных разломов геометрически сопряжена с некоторыми формами магматического гидроразрыва; во-вторых, скважина Е1, расположенная над зоной магмогидротермальной связи, показывает чувствительность к магматическим гидроразрывам под Корякским вулканом.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ и ЯОПН в рамках научного проекта № 21-55-50003 ЯФ\_а «Магматический фракинг и флюидные потоки в вулканических структурах», а также поддержано проектом ИВС ДВО РАН АААА-А20-120121090010-7. Использованные в работе сейсмические данные получены на крупномасштабной научно-исследовательской установке «Сейсмический инфразвуковой массив для мониторинга криолитозоны Арктики и непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (https://ckp-rf.ru/usu/507436/).

- 1. Поздеев А.И. Углеводородная газогенерация Авачинской депрессии, ее перспективы и связь с сейсмичностью // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 44–54.
- 2. Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф. Гидрогеология вулканогенов. СПб.: Наука, 2010. 395 с.
- 3. Мальцева К.И., Котельникова Т.К., Нажалова И.Н. Отчет «Подсчет запасов теплоэнергетических вод Кеткинского месторождения (по состоянию на 31 декабря 2010 г.)» по Контракту № 29/10 от 20.09.2010. (в 2 кн.), Елизово, 2011, 262 с.
- 4. Нурмухамедов А.Г., Нетесов Ю.А. Отчет о геофизических работах, выполненных 2-й Кеткинской партией в 1982—1984 гг. Пиначевская площадь. 1984 г.
- 5. Кирюхин П.А., Кирюхин А.В. Frac-Digger. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №. 2016612168 of 21.06.2016.
- 6. Кирюхин П.А., Кирюхин А.В. Frac-Digger2. Свидетельство о государственной регистрации программного обеспечения для ЭВМ №. 2017618050 of 21.09.2017.
- 7. Копылова Г.Н., Болдина С.В. О связи изменений уровня воды в скважине Е-1, Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008–2009 гг. и сильными (M ≥ 5) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41–54.
- 8. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Изменения давления подземных вод при магматической активизации: на примере скважины Е-1, полуостров Камчатка, Россия // Материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (GEOTHERMAL VOLCANOLOGY WORKSHOP 2020). Петропавловск-Камчатский. 2020. С. 87–90.
- 9. Воронин П.О., Копылова Г.Н. TOUGH-2-EWASG моделирование изменения уровня воды в скважине Е-1 (Елизовский район, полуостров Камчатка) // Материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (GEOTHERMAL VOLCANOLOGY WORKSHOP 2020). Петропавловск-Камчатский. 2020. С. 63–67.

# ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-479-482

Кононов А.М. $^{1,2}$ , Алексеев С.В. $^1$ , Алексеева Л.П. $^1$ , Шолохов П.А. $^1$  Институт земной коры СО РАН, Иркутск, kononov@crust.irk.ru  $^2$ Иркутский национальный исследовательский технический университет

Аннотация. В работе представлена концепция организации гидрогеологических исследований в рамках реализации масштабного комплексного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории». В рамках проекта вырабатываются подходы по объединению различных типов наблюдений, проводимых дистанционными и автоматизированными методами, в единую систему, включающую в себя модули сбора, хранения и обработки данных, прогнозирования и поддержки принятия решений.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, режимные наблюдения.

**Abstract**. The paper presents the concept of organizing hydrogeological research within the framework of the implementation of a large-scale complex project «Fundamentals, methods and technologies—for digital monitoring and forecasting of the environmental situation on the Baikal natural territory». Within the framework of the project, approaches are being developed for combining the types of observations carried out by remote and automated methods into a single system, which includes modules for collecting, storing and processing data, forecasting and supporting decision-making.

Key words: ground waters, monitoring, regime observations.

Байкальская природная территория является очень важным объектом природопользования, поскольку вмещает водосборный бассейн озера Байкал и само озеро, уникальный объект всемирного наследия ЮНЕСКО. Перечень проблем в области охраны водных ресурсов и их рационального использования очень широк, а наличие столь значимого объекта накладывает большое число ограничений видов деятельности, регулирования и управления водным объектом, что в совокупности определяет сложность принятия решений по сохранению и социально-экономическому развитию территории. Поверхностная и подземная гидросфера, как наиболее уязвимый элемент природной среды, испытывает существенные экологические, геодинамические и климатические воздействия, при этом оценить влияние различных факторов и сделать достоверный прогноз без современных и комплексных систем практически невозможно.

Для решения проблемы сохранения озера Байкал предпринята попытка разработки и реализации масштабного комплексного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории». Предпосылки для успешной реализации подобного проекта связаны с развитием методов обработки данных, появлением новых инструментов для наблюдения за различными параметрами подземной и поверхностной гидросферы, а также другими компонентами природной среды. Наличие современного оборудования и технологий позволяет разработать новые подходы к мониторингу и созданию систем предупреждения и прогнозирования.

В рамках инициированного проекта решается весьма сложная задача по объединению различных типов наблюдений, проводимых дистанционными и автоматизированными методами, в единую систему, включающую в себя модули сбора, хранения и обработки данных. Наблюдения, организованные в рамках проекта, проводятся исследователями различного профиля: геологами, геофизиками, гидрогеологами, географами, геохимиками, экологами, биологами, медиками и т.д. Получаемая в ходе наблюдений информация представляет собой огромный массив разнородных и разновременных данных, обработкой и анализом которых будут заниматься математики и специалисты в области информационных технологий. Выявленные в ходе анализа данных закономерности, результаты наблюдений и моделирования лягут в основу современной системы поддержки принятия решений.

Наблюдения за режимом и составом подземных вод выполняются в комплексе геологического мониторинга, включающего геодинамические наблюдения за сейсмическим режимом, радоновой активностью, экзогенными процессами и явлениями. Пилотные станции геологического мониторинга размещаются на полигонах в пределах Байкальской природной территории и названы в соответствии с местами их расположения: «Земная кора», «Бугульдейка», «Черноруд», «Листвянка».

Выбор данных полигонов определяется гидрогеологическими условиями, наличием инфраструктуры для обеспечения бесперебойного электроснабжения систем наблюдения, охраны и безопасности объектов исследовательской инфраструктуры. С гидрогеологических позиций данные полигоны имеют свою специфику, определяющую задачи мониторинга, конфигурацию режимной сети, периодичность наблюдений и содержание комплекса планируемых дополнительных исследований.

**Полигон Бугульдейка** расположен на западном побережье оз. Байкал в долине р. Таловка в 5 км к востоку от п. Бугульдейка. Данный полигон является частью исследовательской инфраструктуры ИЗК СО РАН и включает стационарные пункты режимных геодинамических наблюдений, приборную базу, оборудование и условия для проживания исследователей в период наблюдений.

В геологическом строении полигона принимают участие коренные породы (гнейсы, граниты и мраморы) архея, перекрытые чехлом четвертичных отложений. Кварциты, сланцы, песчаники, гравелиты, мраморы протерозойского возраста, прорванные интрузиями гранитов, дайками диабазов, залегают на склонах и в осевой части Приморского хребта. Нижнекембрийские породы представлены ленским карбонатным комплексом нижнего кембрия, карстующиеся известняки и доломиты комплекса прослеживаются на юговосточных склонах Онотской возвышенности. Четвертичные отложения представлены аллювиальными, делювиальными, пролювиально-аллювиальными, делювиально-пролювиальными разностями.

Согласно схеме гидрогеологического районирования полигон Бугульдейка находится на стыке Байкальской гидрогеологической складчатой области и Ангаро-Ленского артезианского бассейна [1, 2]. В районе полигона распространены порово-пластовые воды четвертичных отложений, трещинно-карстовые, трещинно-пластовые воды осадочных толщ нижнего кембрия и трещинные, трещинно-жильные воды метаморфических и изверженных пород протерозоя.

Водоносные комплексы современных и средневерхнечетвертичных отложений слабоводообильные и имеют преимущественно инфильтрационное питание. По химическому составу воды гидрокарбонатные магниево-кальциевые и магниево-натриево-кальциевые с минерализацией 0.08– $0.70~\rm r/дm^3$ .

Водоносные комплексы, сформированные в коренных отложениях, представлены напорными водами, существенно отличающимися по химическому составу и глубине залегания. В карбонатных закарстованных толщах ленского яруса нижнего кембрия на глубине более 80 м вскрываются подземные воды гидрокарбонатного кальциево-магниевого состава с минерализацией 0.1–0.5 г/дм<sup>3</sup>. В терригенных отложениях венда на глубине от 7 до 81 м формируются гидрокарбонатные, хлоридно-гидрокарбонатные или сульфатно-гидрокарбонатные магниевые и кальциевые воды с минерализацией от 0.5 до 0.6 г/дм<sup>3</sup>. В зонах трещиноватости метаморфических пород протерозоя формируются пресные и ультрапресные воды гидрокарбонатного и хлоридно-гидрокарбонатного магниево-кальциево-кальциево-кальциево-кальциево состава с минерализацией 0.05–0.70 г/дм<sup>3</sup>.

В пределах полигона Бугульдейка подземные воды практически не используются в качестве источников водоснабжения. Туристическая инфраструктура в данном районе развита слабо, что благоприятно сказывается на состоянии и качестве подземных вод.

**Полигон Листвянка** расположен в пределах поселка Листвянка, в предгорье Приморского хребта в истоке р. Ангары. В геологическом строении полигона принимают участие гнейсы, гранитогнейсы и граниты китойского комплекса архея — нижнего

протерозоя, разбитые сетью тектонических трещин. Аллювиальные отложения четвертичного возраста слагают пойменные и надпойменные террасы, они представлены гравийно-галечными и валунно-галечными образованиями с песчаным и супесчаным заполнителем.

Согласно схеме гидрогеологического районирования Прибайкалья муниципальное образование расположено на стыке Иркутского артезианского бассейна с Байкальской горноскладчатой гидрогеологической областью [1, 2]. Территория характеризуется преимущественным развитием подземных вод в трещиноватых кристаллических горных породах и порово-пластовых вод в рыхлых четвертичных отложениях.

Водоносный комплекс четвертичных аллювиальных отложений формируют безнапорные подземные воды, вскрывающиеся на глубинах от 1 до 3 м. По химическому составу подземные воды гидрокарбонатные магниево-кальциевые с минерализацией от 0.17 до  $0.54 \, \text{г/дм}^3$ .

Китойская трещиноватая зона обводненных пород вмещает напорные воды, имеющие преимущественно атмосферное питание (склоновый сток с окружающих хребтов и предгорий), а также частичное питание за счет подземного стока вышезалегающих четвертичных отложений [3]. Подземные воды — ультрапресные, пресные гидрокарбонатного кальциевого или гидрокарбонатного магниевого состава с минерализацией 0.03–0.17 г/дм<sup>3</sup>.

Подземные воды используются населением в качестве источника водоснабжения, при этом качественное состояние подземных вод частных скважин и колодцев удовлетворительное. В целом содержание всех компонентов подземных вод в этих водопунктах не превышает ПДК для питьевых вод, за исключением 16 колодцев и 8 скважин, в воде которых обнаружено повышенное содержание нитратов и аммония (один случай). Превышение ПДК по нитратам изменяется от небольшой величины (в 1.1 раза) до угрожающей — в 5.9 раза, что, безусловно, исключает возможность использования воды из этих водопунктов в качестве питьевой [4]. Загрязнение водоносного горизонта происходит в результате утечек бытовых стоков из неправильно оборудованных септиков близ расположенных гостиничных и туристических комплексов.

**Полигон Черноруд** распложен в Западном Приольхонье, в окрестностях села Шара-Тагот Ольхонского района Иркутской области, на учебной базе практик «Черноруд» ФГБОУ ВО «ИРНИТУ».

Значительную часть объема пород в урочище Черноруд составляют первичноинтрузивные образования базитового и ультрабазитового состава [5]. На расстоянии в 
несколько десятков метров можно наблюдать последовательный переход от пород 
ультрабазитового состава до субгранитного. На участке можно видеть характерную для 
Чернорудской зоны картину соотношения разновозрастных элементов структуры – складок и 
соответствующих им плоскостных текстур. Четвертичные отложения перерывают коренные 
породы архейско-протерозойского возраста в речных долинах, они представлены обломками 
скальных, магматических и метаморфических пород.

Гидрогеологические условия полигона определяются прежде всего его приуроченностью в структурно-тектоническом отношении к континентальной Байкальской рифтовой зоне со спрединговым геодинамическим режимом развития [6, 7].

Водоносная зона трещиноватости архея — нижнего протерозоя выделяется в зоне выветривания магматических и метаморфозных образований архейского и протерозойского возраста, слагающих горные сооружения Приморского хребта и его отрогов. Она характеризуется атмосферным питанием, наличием малодебитных родников, дренирующих водоносные зоны массивов, гидрокарбонатным магниево-кальциевым составом подземных вод с минерализацией 0.20–0.24 г/дм<sup>3</sup>.

Наиболее водообильными в районе являются трещинно-жильные и трещинно-карстовые коллекторы. Дебиты дренирующих их родников достигают 40 л/с и более. Трещинно-жильные воды обладают напором, по химическому составу они гидрокарбонатные натриево-магниево-кальциевые с минерализацией до 0.25 г/дм<sup>3</sup>.

В четвертичных отложениях в долине р. Кучулга и ее боковых распадках формируются порово-пластовые подземные воды в аллювиальных, пролювиальных и других генетических типах верхнечетвертичных и современных отложений. Дебиты естественных водопроявлений достигают 3.5–4.0 л/с. По химическому составу порово-пластовые воды гидрокарбонатные магниево-кальциевые с минерализацией до 0.23–0.33 г/дм<sup>3</sup>. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, поверхностных вод и, в ряде случаев, в результате разгрузки трещинно-жилищных вод. Воды четвертичных отложений каптируются колодцами и используются местным населением с. Черноруд для хозяйственно-бытовых целей.

В пределах выделенных полигонов проводится комплекс гидрогеологических исследований, направленных на определение параметров режимной сети, конструкции наблюдательных скважин и комплектации оборудования. Наблюдения проводятся при помощи автоматизированных систем мониторинга компании Solinst. В состав базовой станции входят датчики регистрации уровня подземных вод, датчики температуры и давления. Наряду с регистрацией параметров режима подземных вод будет производиться ежеквартальное опробование водопунктов для химического и изотопного анализа в лабораторных условиях (полный химический анализ подземных вод, определение компонентов, характеризующих качество подземных вод, изотопов кислорода и дейтерия).

Проектируемая система мониторинга позволит оценивать формирование естественного режима в годовом цикле наблюдений, динамику режима уровней подземных вод при сейсмических событиях, изменение качества подземных вод. Полученные данные в комплексе с другими видами наблюдений будут использованы для прогноза сильных землетрясений в Прибайкалье на основе эманационного мониторинга, прогноза опасных экзогенных геологических процессов, а также для разработки образовательных программ, курсов и проведения учебных практик и стажировок.

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования  $P\Phi$  (грант № 075-15-2020-787 на реализацию крупного научного проекта «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

- 1. Гидрогеология СССР. Т. XIX. Иркутская область / Вед. ред. В.Г. Ткачук. М.: Недра, 1968. 495 с.
- 2. Гидрогеология Прибайкалья / Отв. ред. Е.В. Пиннекер. М.: Наука, 1968. 170 с.
- 3. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Алексеев В.Р., Кононов А.М., Шолохов П.А. Гидрогеологические условия поселка Листвянка // География и природные ресурсы. Спецвыпуск. 2016. № 6. С. 32–37.
- 4. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Шолохов П.А., Оргильянов А.И., Кононов А.М. Качество подземных и поверхностных вод поселка Листвянка (юго-западное побережье озера Байкал) // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 105–114.
- 5. Геологические памятники Байкала / Составитель Г.В. Рязанов. Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма, 1993. 160 с.
- 6. Диденков Ю.Н., Аузина Л.И., Верхозин И.И. Структурно-гидрогеологические условия района Байкальского учебного полигона (Западное Прибайкалье) // Геофизика на пороге третьего тысячелетия. Иркутск, 2001. С. 31–44.
- 7. Кононов А.М., Абдулин Р.З. Структурно-гидрогеологические условия района Байкальского учебного полигона // Проблемы геологии и освоения недр. Тр. V Междунар. симп. студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск: STT, 2001. С. 152–153.

## ОРГАНИЧЕСКИЕ МИКРОПРИМЕСИ В ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ УГОЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-483-488

Король И.С.<sup>1</sup>, Лепокурова О.Е.<sup>1,2</sup>, Домрочева Е.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Томск, LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru, KorolIS@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

Аннотация. Изучено содержание органических микропримесей в высокоминерализованных подземных водах угольных отложений Нарыкско-Осташкинской площади. Определен структурно-групповой состав растворенного органического вещества (РОВ) битуминозных концентратов вод. Установлено, что РОВ представлены углеводородами (УВ) от 80.91 до 91.44 %. Среди УВ на долю н-алканов приходится от 67.4 до 74.9 %. Содержание изо-алканов колеблется в пределах 9.6–13.2 %, ароматических УВ – 7.14–10.09 %, а доля нафтеновых составляет от 4.07 до 6.26 %. Гетероатомные соединения представлены жирными карбоновыми кислотами ряда  $C_{14}$ - $C_{29}$  в свободной и сложноэфирной форме, бензофуранами, бензофенонами, диметилзамещенными фенолами, алкилтиофенами и диметилзамещенными дибензофенами.

**Ключевые слова**: растворенное органическое вещество, органические примеси, подземные воды, угленосные отложения, Кузбасс.

**Abstract.** The content of organic micro-impurities in highly mineralized underground waters of coal deposits of the Naryksko-Ostashkinskaya area from different depths was studied. The structural and group composition of the dissolved organic matter (DOM) of bituminous water concentrates is determined. It is established that the DOM is represented by hydrocarbons (HC) from 80.91 to 91.44 %. Among HC, the share of n-alkanes is from 67.4 to 74.9 %. The content of iso-alkanes ranges from 9.6-13.2%, aromatic hydrocarbons from 7.14–10.09 %, and the share of naphthenic compounds ranges from 4.07 to 6.26 %. Heteroatomic compounds are represented by: fatty carboxylic acids of the  $C_{14}$ - $C_{29}$  series in free and ester form, benzofurans, and benzophenones. dimethyl-substituted phenols, alkyl-thiophenes, and dimethyl-substituted dibenzophenes.

Key words: dissolved organic matter, organic impurities, groundwater, coal-bearing deposits, the Kuznetsk basin.

#### Введение

Представленный материал является продолжением исследования растворенного органического вещества (РОВ) в подземных водах на территории Кузнецкого угольного бассейна [1] в связи с начатым бурением скважин в рамках работ, связанных с добычей метана из угольных пластов. Кроме широко обсуждаемого экологического аспекта, а также проблемы формирования органоминеральных комплексов, интерес к РОВ связан и с более фундаментальной задачей — его ролью в формировании химического состава вод. Как известно, при участии органического вещества образуется основной анион для зон активного и замедленного водообмена — гидрокарбонат-ион (НСО<sub>3</sub><sup>-</sup>). При этом регулируется рН среды за счет нейтрализации щелочности, образующейся при гидролизе пород.

Один из самых крупных в мире угольный бассейн накладывает региональную специфику нагрузок на водные системы и представляется удачной площадкой для изучения РОВ. Некоторые особенности состава и распределения органических примесей в пресных поверхностных и подземных водах зоны активного водообмена Кузбасса были рассмотрены в работах [1–6]. Однако в зоне замедленного водообмена, в условиях присутствия угольных отложений, детальные исследования не проводились. Именно здесь были обнаружены уникальные содовые воды высокой минерализации (до 27 г/л), о которых неоднократно писалось ранее [2], в формировании которых большую роль сыграла органика.

Под органическими примесями (микропримесями) понимаются отдельные группы органических веществ (например, битумы, смолы, гумусовые вещества и др.) или даже индивидуальные органические соединения, такие как органические кислоты (уксусная, муравьиная и др.), ароматические углеводороды (бензол, толуол и др.). Как правило, гидрогеологами для описания РОВ чаще используются общие количественные показатели – концентрация органического углерода ( $C_{\rm opr}$ ) и различные параметры окисляемости: перманганатная окисляемость ( $\Pi$ O), химическое потребление кислорода ( $X\Pi$ K),

биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>) и др. Эти показатели нами были описаны ранее [1]. Органические примеси используются значительно реже в связи с трудоемким аналитическим процессом, а иногда и невозможностью их выделения из-за низких концентраций. К тому же не всегда понятна итоговая практическая значимость такого изучения, нет четких критериев или индикаторов их использования.

Цель данного исследования рассмотреть особенности органических микропримесей в высокоминерализованных содовых подземных водах угленосных отложений, чтобы в дальнейшем использовать эти результаты для реконструкции условий формирования подземных вод.

#### Методы исследований

Экспедиционные геохимические исследования поверхностных и подземных вод на площадях потенциальной промышленной добычи угольного метана в Кузбассе регулярно проводились сотрудниками ТФ ИНГГ СО РАН в ходе совместных работ с ООО «Газпром добыча Кузнецк» в 2002–2020 гг. Методика отбора проб и аналитических работ неоднократно описывалась в предыдущих материалах [1, 2 и др.]. Химический состав вод определялся в Проблемной научно-исследовательской гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета.

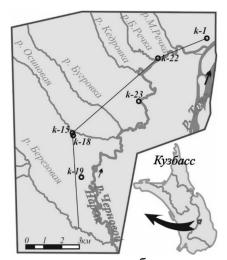


Схема расположения опробованных скважин.

Непосредственно на органические микропримеси были отобраны шесть проб вод из шести различных скважин в марте 2014 г. (рисунок) на глубине от 160 до 1170 м. Для установления структурно-группового состава РОВ подземных вод использовалась методика [7], основанная на получении битуминозных концентратов трехступенчатой экстракцией хлороформом при значениях рН - 2, 7 и 11 и последующим анализом методом газовой хромато-масс-спектрометрии (ГХ-МС) на хромато-масс-спектрометре Finnigan DSQ-EI/250 (Thermo Scientific, США) и хроматографической капиллярной колонке TR-5MS 30 m×0.25 mm ID×0.25 µm, с фазой 5 % Phenyl Polysilphenylene-siloxane. Режим проведения анализа: газ-носитель – гелий, температура испарителя и интерфейса 250 °C, программа нагрева термостата:  $t_{\text{нач}} = 80$  °C, изотерма в течение 2 мин, нагрев со скоростью 4 град/мин до  $t_{\text{max}} =$ 300 °C, термостатирование в течение 20 мин. Масс-спектры получены методом электронной ионизации с энергией ионизирующих электронов – 70 eV, температура камеры ионизации диапазон регистрируемых масс 50-500. Индивидуальные идентифицировали с использованием компьютерной библиотеки масс-спектров NIST-5 и WILEY-8. Количественные определения проводили по площадям пиков с использованием дейтероаценафтена С<sub>12</sub>D<sub>10</sub> в качестве внутреннего стандарта. Выбор данной методики обусловлен тем, что она не позволяет экстрагировать хлороформом самые известные органические соединения, растворенные в воде, - фульвовые и гуминовые кислоты [8]. В наших образцах содержание ФК и ГК достаточно высокое – до 115 мг/л [1].

#### Объект исследований

Нарыкско-Осташкинская площадь Ерунаковского района Кемеровской области расположена в центральной части Кузнецкого угольного бассейна. Она представляет собой брахисинклинальную структуру, осложненную тектоническими нарушениями. Подавляющая часть разреза сложена в основном угленосно-терригенными отложениями кольчугинской серии (Р2-Р3), представленной песчаниками, алевролитами и аргиллитами с включением до 50 угольных пластов. Эта серия делится на ерунаковскую (мощность 1.2–1.6 км) и ильинскую (мощность 0.8–1.2 км) подсерии. Наиболее мощные угольные пласты (более 10– 12 м) средней стадии метаморфизма (Г, Ж, К) развиты в пределах ерунаковской подсерии. Выше по разрезу распространены триасовые (мальцевская серия) и юрские (конгломератовая серия) отложения. Сверху коренные породы покрыты маломощными рыхлыми отложениями кайнозойского возраста, представленными глинами, суглинками и гравийно-галечниками. По литолого-стратиграфическим и гидродинамическим признакам здесь выделяются четыре водоносных комплекса: водоносный комплекс четвертичных аллювиальных отложений, водоносный комплекс нерасчлененных юрских отложений, водоносный нерасчлененных триасовых отложений мальцевской серии и водоносный комплекс средневерхнепермских отложений ерунаковской подсерии. Последний пользуется самым широким распространением и занимает почти всю площадь.

Изученные подземные воды залегают в трешинах и порах кольчугинской серии пород в зоне замедленного водообмена. Мощность верхней зоны повышенной трещиноватости колеблется от 25 до 150 м. Дебиты скважин, как правило, невелики и, за редким исключением, не превышают 20 м<sup>3</sup>/сут. При этом какой-либо зависимости расходов воды от глубины их залегания не устанавливается. Проницаемость отложений также не зависит от глубины, но она несколько выше в угольных пластах по сравнению с другими типами горных пород. Воды по составу гидрокарбонатные натриевые (содовые). В Кузбассе «типичные» содовые воды широко распространены начиная с глубины 50-200 м. Как правило, они имеют соленость от 0.6 до 2 г/л (реже до 4-5 г/л). Однако именно на Нарыкско-Осташкинской площади, в связи с начатым бурением на угольный метан, впервые обнаружены содовые воды необычно высокой минерализации – 4–27 г/л (таблица). Залегают они в тех же отложениях кольчугинской свиты, что и воды, типичные по составу для данной территории, но развиты они на больших глубинах (в нижней части зоны замедленного водообмена), т.е. на менее проницаемых участках и непосредственно в пределах угольных отложений. Некоторые вариации химического состава на глубинах 400-700 м (таблица) связаны, возможно, с разной проницаемостью пород, наличием разломов, разной обогащенностью отложений углем [2].

Для изучаемых содовых вод концентрация органических веществ Сорг изменяется от 7.4 до 52.8 мг/л при значениях рН в пределах 7.5–8.5 и парциальном давлении СО<sub>2</sub> (lgPCO<sub>2</sub> до 2.7). Сделано предположение [1, 2], что в формировании состава данных вод активное участие принимало органическое вещество, поэтому интересно было более детально рассмотреть его особенности.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Органические соединения в воде могут не только претерпевать аэробное биохимическое окисление в результате жизнедеятельности бактерий, но и участвовать в реакциях окисления при наличии окислителей и соответствующих условий среды. Количественные характеристики органических микропримесей изучаемых содовых вод неоднородны и отличаются в пределах участка отбора проб; в нашем случае хлороформенные концентраты (ХК) содержат растворенного органического вещества от 0.87 до 1.85 г/л.

Информативным интегральным показателем является окисляемость, или ХПК, которая характеризует суммарное содержание в воде органических веществ. При определении ХПК углерод количественно окисляется до  $CO_2$ , сера и фосфор (если они присутствуют в соединении) до  $SO_3$  и  $P_2O_5$ , а водород переходит в структуру  $H_2O$  или

аммонийной соли. Для исследуемых подземных вод бихроматная окисляемость изменяется в пределах от 19 до 188.5 мг О/л. Другой показатель – перманганатная окисляемость (ПО), используемый для определения содержания легкоокисляющихся органических веществ природного происхождения, варьируется от 0.5 до 16.2 мг О/л. Анализируя полученные результаты, можно составить первичную характеристику органических примесей. Так, вода в точке отбора k-19, содержащая  $C_{\rm opr}$  52.8 мл/л, обогащена легкоокисляющимися алифатическими соединениями (ПО – 16.9 мг/л) и соединениями ароматического строения, способными к протеканию окислительных реакций (ПО/ХПК – 0.57). Соотношение ПО/ХПК для органических микропримесей Нарыкско-Осташкинской площади изменяется от 0.03 до 0.57. Согласно данному соотношению, вода с точки отбора k-23 более обогащена наиболее превращенными, трудноокисляемыми ароматическими соединениями, способными к растворению, адсорбции и миграции.

Результаты ГХ-МС анализа состава РОВ в ХК представлены в таблице.

Некоторые показатели состава подземных вод и РОВ

Параметры		Содержание						
		k-19	k-15	k-23	k-22	k-18		
Глубина, м	169	437	548	682	1070	1170		
pН	7.5	8.5	8.0	8.3	7.7	8.1		
Соленость, мг/л	977	17062	9436	1499	25139	12015		
НСО <sub>3</sub> , мг/л	682	5734	6149	950	15494	6930		
$Na^+$ , $M\Gamma/\Pi$	190	5630	2670	426	7230	3522		
Сорг, мг/л	7.4	52.8	45.6	19.1	_	13.8		
ФК, мг/л	14.7	115.0	99.7		_	20.1		
ГК, мг/л	1.2	0.9	0.5	_	_	0.7		
ПО, мг О/л	1.2	16.2	2.8	0.5	6.1	6.9		
ХПК, мг О/л	_	28.4	23.0	19.0	118.5	30.9		
ПО/ХПК	_	0.57	0.12	0.03	0.05	0.22		
Сров, г/л	0.8721	0.9245	1.0973	1.5685	1.8516	1.6251		
$\Sigma$ Алканы ( $\Sigma C_{11}$ - $C_{33}$ ), % отн.	67.4	74.9	69.9	67.5	71.2	70.3		
Стераны, % отн.	2.28	4.12	3.89	2.54	3.58	5.02		
Гопаны, % отн.	1.74	1.58	1.39	2.03	1.86	1.24		
Циклогексаны, % отн.	0.89	0.75	1.03	0.94	1.22	0.82		
Алкилбензолы, % отн.	0.41	0.59	0.42	0.62	0.75	0.26		
Нафталины, в т.ч. замещенные, % отн.	3.96	4.23	3.65	3.06	3.39	3.48		
Фенантрены, в т.ч. замещенные, % отн.	4.23	5.27	4.12	3.68	4.31	3.59		
Карбоновые кислоты и их сложные эфиры, % отн.	7.79	2.59	8.45	9.16	7.15	7.12		
Фенолы, в т.ч. замещенные, % отн.	0.84	0.12	0.96	0.72	0.92	1.15		
S, N- содержащие соединения, % отн.	1.27	0.59	2.34	1.55	0.83	2.78		
Фталаты, % отн.	7.59	5.22	3.65	8.19	4.78	4.22		

Примечание.  $C_{opr}$  — органический углерод,  $\Phi K$  — фульвокислоты,  $\Gamma K$  — гуминовые кислоты,  $\Pi O$  — перманганатная окисляемость,  $X\Pi K$  — химическое потребление кислорода,  $C_{POB}$  — сумма органических микропримесей.

В доминирующем составе все битуминозные концентраты представлены углеводородами (УВ) от 80.91 до 91.44 %. Среди углеводородов на долю н-алканов приходится от 67.4 до 74.9 %. Содержание изо-алканов колеблется в пределах 9.6-13.2 %, ароматических УВ 7.14-10.09 %, а доля нафтеновых составляет от 4.07 до 6.26 %. Во всех

РОВ, выделенных из содовых вод в хлороформенный концентрат, идентифицированы н-алканы состава  $C_{11}-C_{33}$ , характерные как для нефтей, так и для высшей наземной растительности (липидов). Кривые молекулярно-массового распределения (ММР) н-алканов двух типов, для вод с участков k-1, k-18, k-23 мономодальные, а для участков k-15, k-19, k-22 — бимодальные. Для мономодальных ММР определяется пик на  $C_{18}$ - $C_{19}$ , для бимодальных первый пик зафиксирован на  $C_{17}$ - $C_{19}$ , второй на  $C_{28}$ - $C_{32}$ . Изо-алканы представлены как 2- или 3-метилзамещенные с длинной цепи от  $C_{11}$  до  $C_{22}$ , а также изопреноидами — фитаном и пристаном. Геохимический коэффициент отношения  $\Sigma$  изопренанов/ $\Sigma$  н-алканов колеблется от 0.02 до 5.44, что отражает генетическую разнородность углеводородов в составе XK. В составе стеранов, рассчитанном по m/z = 217, преобладает этилхолестан от 27 до 33 %. Для гопанов (m/z = 191) фиксируется максимум на группе хейлантанов состава  $C_{28}$ - $C_{31}$ . Ароматические УВ идентифицированы как алкилбензолы с заместителями состава  $C_{3}$ - $C_{8}$ , замещенными нафталинами состава 1.5- или 1.6- диметилнафталины; 1,4,6- 1,6,7- или 2,3,6- триметилнафталины и замещенными три- и тетраметилфенантренами.

Гетероатомные соединения в основном представлены кислородсодержащими соединениями: жирными карбоновыми кислотами ряда  $C_{14}$ - $C_{29}$  в свободной и сложноэфирной форме, замещенными фенолами, бензофуранами и бензофенонами. Среди карбоновых кислот доминируют н-эйкозановая (2.24–1.43 %), н-октадекановая (0.9–1.12 %) и олеиновая (1.23–1.67 %), среди эфиров – метиловый эфир гександекановой кислоты. Фенолы представлены диметилзамещенными структурами в положении 2,5-, 2,3-, 2,6-, 3,4-. Идентифицированы сернистые соединения: алкилтиофены с заместителями состава –  $CH_3$ , —  $C_2H_5$  и н- $C_6H_{13}$ , дибензофены и их диметилзамещенные гомологи. Азотистые соединения представлены этилпиразином, 3-метилиндолом и амидом олеиновой кислоты. Присутствие фталатов в исследуемых водах до 8.19 %, очевидно, связано с антропогенной нагрузкой на данную территорию.

Наличие в составе РОВ нафтеновых углеводородов ряда стерана и гопана, а также высокой концентрации н-алканов  $C_{22}$ - $C_{33}$  указывает на возможность их миграции с подземными водами или протекание процессов взаимодействия с контактирующими породами. Построение цифровой модели процесса могло бы уточнить, какой из этих процессов более предпочтителен.

Какие-либо закономерности изменения РОВ от солености вод, химического состава, рН и глубины не были четко выявлены, что, видимо, связано с наложением нескольких процессов, в том числе сложных процессов преобразования органического вещества [1]. Можно только отметить, что с глубиной вод увеличивается сумма органических микропримесей ( $C_{POB}$ ) и показатель  $\PiO/X\PiK$ .

#### Заключение

Полученные данные расширяют наши представления о накоплении и распределении органических веществ в подземных водах угольных отложений. Наличие УВ ациклического и ароматического рядов в высокоминерализованных водах Нарыкско-Осташкинской площади Кузбасса позволяет в дальнейшей работе рассчитать базовые гидрогеохимическим показатели и рассмотреть вопросы реконструкции при влиянии угольных отложений на содержание в них микропримесей и их участия в формировании содовых подземных вод. Поскольку данные исследования требуют детальной разработки и систематизации, то, как правило, все исследователи ограничиваются приведением состава микропримесей и констатацией того факта, что они в водах есть. Исследование единичных образцов не может дать ответ на все возникающие вопросы, но и оно показывает необходимость дальнейших шагов для развития теоретических и практических применений.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №20-05-00127 и №19-05-00290 и проекта ФНИ №0331-2019-0026.

- 1. Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Гуминовые вещества в природных водах Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 3.
- 2. Лепокурова О.Е. Содовые подземные воды юга Кузбасса: изотопно-химические особенности и условия формирования // Геохимия. 2018. № 9. С. 904–919.
- 3. Рассказов Н.М., Шварцев С.Л., Трифонова Н.А., Наливайко Н.Г. Нелетучие органические вещества и микроорганизмы в подземных водах района Крапивинского водохранилища на реке Томь (Кузбасс) // Геология и геофизика. 1995. № 4. С. 30–36.
- 4. Kontorovich A.E., Shvartsev S.L., Rasskazov N.M., Zuev V.A., Turov Yu.P. Organic trace contaminants in fresh natural waters from the drainage basins of Tom' and upper Ob' rivers // Geochemistry International. 2000. V. 38, № 5. P. 480–490.
- 5. Савичев О.Г. Реки Томской области: состояние, охрана и использование. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 202 с.
- 6. Огнетова М.П., Домрочева Е.В. Содержание органических микропримесей в водах зоны активного водообмена юга Кузбасса // Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Иркутск: ИрГТУ, 2006. С. 93–97.
- 7. МУК 4.1. 663-97. Методические указания «Определение массовой концентрации органических соединений в воде методом хромато-масс-спектрометрии». М.: Минздрав России, 1997.
  - 8. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во Московского университета, 1985. 376 с.

# ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СЕВЕРА ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ (НА ПРИМЕРЕ СТРЕЖЕВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-489-493

Кузеванов К.К.<sup>1</sup>, Кузеванов К.И.<sup>1</sup>, Дутова Е.М.<sup>1</sup>, Вологдина И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, kuzevanovkk@tpu.ru, kki@tpu.ru, dutova@sibmail.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, ivv@ggf.tsu.ru

Аннотация. Работа связана с необходимостью текущего изучения качества подземных вод, используемых для водоснабжения населения, и проблемами изменения химического состава подземных вод под влиянием эксплуатации. Эти изменения зависят как от природной ландшафтно-климатической и гидрогеохимической зональности, так и от режима эксплуатации водозабора. В основу работы положены результаты локального мониторинга на действующем водозаборе за длительный период наблюдений в рамках решения задач эксплуатационной разведки на действующем месторождении подземных вод. Обработка результатов мониторинговых исследований показала, что в процессе интенсивной эксплуатации подземных вод возникают благоприятные условия для накопления железа в растворенной и трудноизвлекаемой форме.

**Ключевые слова:** месторождение подземных вод, химический состав, мониторинг подземных вод, изменение гидрогеохимического режима.

**Abstract.** The research is relevant due to the need for studying the current condition of underground waters used as water supplies and analyzing the problems connected with the change in the chemical composition of underground waters caused by operation. These changes depend both on natural landscape and climatic and hydrogeochemical zonality, and on the mode of operation of a water intake. The local monitoring of an operating water intake has been conducted for a long period of time with the aim of solving operational investigation tasks on the operating field of underground waters. The analysis of monitoring results has shown that in the course of intensive operation of underground waters there arise favorable conditions for accumulating iron in the dissolved and hard-to-recovered form.

**Key words:** Field of underground waters, chemical composition, monitoring underground waters, change in hydrogeochemical mode.

Проблемам эксплуатации месторождений питьевых подземных посвящено множество публикаций [1–3]. Зачастую освещаются вопросы влияния водоотбора на характеристики геологической среды [4]. Имеются работы, посвященные оптимизации и сохранению ресурсов эксплуатируемых месторождений под влиянием различных типов в граничных условиях [5, 6]. Наконец, особое внимание уделяется вопросам качества эксплуатируемых подземных вод [7, 8]. Поведению железа, как элемента, зачастую ухудшающего качество вод, посвящено много работ. Это исследования, касающиеся влияния параметров геохимической среды на его миграционные процессы [9–11], вопросы технологий водоподготовки [12, 13] и минералообразования в пластовых и технологических процессах [14] и др.

Цель данной работы заключается в оценке влияния гидродинамических условий на изменения качества подземных вод эксплуатируемых месторождений пластового типа. Для этих типовых условий характерны: сработка упругих запасов напорных вод, большие по площади депрессионные воронки, активизация или формирование процессов перетекания за счет вышележащих водоносных горизонтов и поверхностных вод.

В данной работе приведены результаты многолетних исследований режима эксплуатации Стрежевского месторождения подземных вод; установлено, что под влиянием работы водозаборных скважин изменяется геохимический облик подземных вод в пластовых условиях. Это может оказывать существенное влияние на устойчивость ионов железа в растворенном состоянии, что способствует снижению эффективности технологии водоподготовки, применяющейся на водозаборе для обработки воды перед подачей потребителям.

Эволюция гидрогеохимической среды рассматривается на примере водозабора г. Стрежевого, эксплуатирующего подземные воды палеогеновых отложений Западно-Сибирского артезианского бассейна. Работа водозабора характеризует типовые условия техногенных процессов, возникающих при добыче подземных вод хозяйственно-питьевого назначения на многочисленных месторождениях подземных вод, расположенных в ландшафтных условиях средней тайги с повышенной заболоченностью [15]. Оценка характера техногенных изменений состава подземных вод основана на исследовании материалов многолетних режимных наблюдений, которые регулярно проводятся в рамках мониторинга, регламентированного лицензионным Используемая на водозаборе технология водоподготовки основана на физико-химическом процессе аэрации, который способствует активному переходу ионов нерастворимую форму и позволяет существенно снижать их концентрацию в подземных водах, подаваемых в распределительную сеть.

Стрежевское месторождение подземных вод разведано для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения населения города Стрежевого. Месторождение находится вблизи северо-восточной окраины города. Для эксплуатации используются подземные воды палеогеновых отложений новомихайловской, атлымской и тавдинской свит. Схема водозабора представляет собой площадную систему, которая состоит из 21 наблюдательной и 17 эксплуатационных скважин. (рис. 1).

Водозабор существует с 1973 г. За время эксплуатации общий годовой водоотбор изменялся. С начала 70-х гг. он составлял около 1096 м³/сут. Затем повышался до конца 90-х гг., когда максимум составил свыше 12 000 м³/сут. Затем общий водоотбор постепенно снижался и в настоящее время составляет порядка 5000 м³/сут.

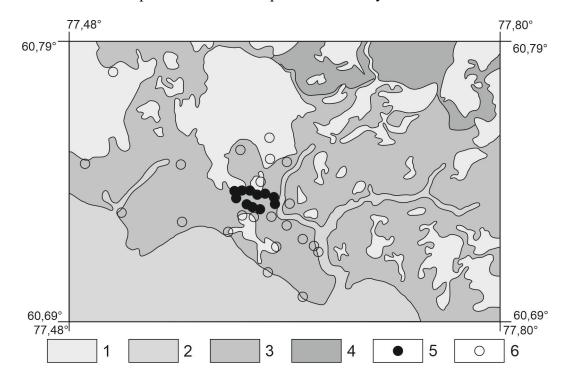


Рис. 1. Схематическая гидрогеологическая карта района Стрежевского месторождения подземных вод. Водоносные горизонты: I — современных аллювиальных отложений, 2 — современных болотных отложений, 3 — аллювиальных отложений второй надпойменной террасы, 4 — аллювиальных отложений второй надпойменной террасы. Скважины: 5 — эксплуатационная, 6 — наблюдательная.

Химический состав вод эксплуатируемых отложений типичен для подземных вод, формирующихся в ландшафтно-климатических условиях средней тайги. Они ультрапресные, умеренно пресные, гидрокарбонатные кальциевые, кальциево-магниевые, умеренно жесткие.

За длительный период работы водозабора, по данным АО «Томскгеомониторинг», в эксплуатационном водоносном комплексе палеогеновых отложений сформировалась депрессионная воронка, границы распространения которой не могут быть точно определены из-за недостаточного количества наблюдательных скважин за пределами площади водозаборного участка. Уменьшение водоотбора сказалось на положении уровня подземных эксплуатируемого водоносного комплекса. Так, например, общая пьезометрической поверхности в 2000 г. изменялась по площади водозабора от 1.00 до 6.85 м и уменьшилась по сравнению с предшествующим годом на 0.14-0.71 м. В верхнем верхнеолигоценовых отложений горизонте трайгородской верхнечетвертичных отложений второй надпойменной террасы р. Оби общее снижение уровня в пределах водозабора за этот период изменялось от 0.71 до 1.68 м.

Анализ изменения гидрогеологических условий месторождения подземных вод под влиянием длительной эксплуатации показывает наличие устойчивых тенденций в проявлении гидродинамического и гидрогеохимического режима подземных вод.

Исходный материал, на основе которого сделаны эти выводы, представлен данными многолетних режимных наблюдений, включающими фактические замеры динамических уровней подземных вод и результаты систематического опробования их химического состава по эксплуатационным и режимным скважинам водозабора.

Динамика изменения уровенного режима подземных вод под воздействием эксплуатации отражает общие закономерности формирования понижения в границах депрессивной воронки и связана с характером изменения нагрузки на водозаборные скважины под влиянием водоотбора, то есть полностью объясняется техногенным фактором.

За время работы водозабора отмечается изменение нагрузки на скважины, которое, в свою очередь, тесно связано с величиной водоотбора и оказывает решающее влияние на динамические уровни пьезометрической поверхности и формирование ее понижения.

В режиме эксплуатации водозабора можно выделить два основных этапа. Первый этап соответствует периоду наращивания фонда эксплуатационных (водозаборных) скважин. Он заканчивается в 1989 г. После этого работа водозабора характеризуется активным перераспределением нагрузки между существующими водозаборными скважинами. Иногда отдельные скважины временно выводятся из эксплуатации. По наблюдательным скважинам отмечается интенсивный рост глубины динамических уровней на первом этапе, а на втором этапе достигается некоторая стабилизация депрессионной воронки.

Самые сильные изменения динамических уровней по отдельным эксплуатационным скважинам фиксируются на втором этапе эксплуатации водозабора. В это время работа скважин характеризуется максимальными амплитудами величины действующего напора, интенсифицирующей процессы вертикальных перетоков за счет формирования привлекаемых ресурсов из вышележащего водоносного горизонта неоген-четвертичных отложений.

Эти особенности эксплуатации водозабора оказывают существенное влияние на изменение в химическом составе подземных вод. По данным режимных наблюдений установлена зависимость между изменением концентрации ионов железа и величиной водородного показателя рН (рис. 2). Обобщенные данные по всем скважинам водозабора показывают, что с уменьшением величины водородного показателя рН за счет подкисления подземных вод эксплуатационного водоносного горизонта фильтрационным потоком перетекания сверху происходит рост концентрации ионов железа.

Выявленная тенденция в поведении концентрации железа может объясняться тем, что при формировании депрессионной воронки в процессе эксплуатации водозабора возникает и сохраняется во времени своеобразный геохимический барьер за счет подтягивания кислых подземных вод из поверхностного водоносного горизонта, химический состав которого формируется под выраженным влиянием болотных вод с низким значением водородного показателя рН. Таким образом формируются благоприятные условия для роста концентрации ионов железа в растворенной форме.

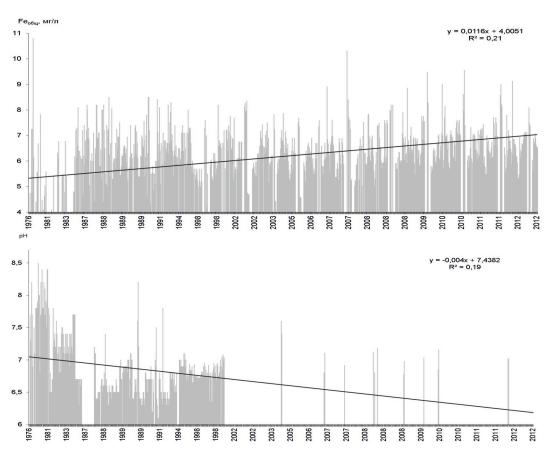


Рис. 2. Изменение содержания железа общего и величины рН в подземных водах за время эксплуатации водозабора.

Анализ химического состава по отдельным водозаборным скважинам показывает, что выявленная тенденция в поведении концентрации железа изменяется по площади водозаборного участка. Скорее всего, это может быть связано с неоднородностью геологического разреза и формированием сложного характера процессов вертикального перетекания за счет литологических окон в раздельных толщах или, наоборот, увеличения мощности водоупоров на отдельных локальных участках.

На основе анализа техногенных изменений гидрогеологических условий установлено:

- 1. Ведущим фактором формирования эксплуатационных запасов подземных вод является возможность их восполнения за счет емкостных запасов эксплуатационного водоносного комплекса палеогеновых отложений и привлекаемых ресурсов неогенчетвертичного водоносного комплекса, которые составляют подчиненную, но значительную часть в суммарном водоотборе эксплуатационных скважин.
- 2. В свою очередь, запасы подземных вод неоген-четвертичного водоносного комплекса пополняются избыточным (по сравнению с величиной испарения) количеством атмосферных осадков и обеспечены влиянием питающих границ (первого рода), представленных многочисленными (и обширными по площади) болотными массивами и другими поверхностными водоемами и водотоками.
- 3. Обширные болотные массивы способствуют формированию восстановительной геохимической обстановки водной среды, которая под влиянием разницы напоров за счет создания депрессии в эксплуатационном водоносном комплексе способна оказывать влияние на изменение условий водной среды в нижних частях гидрогеологического разреза в зоне работы фильтров водозаборных скважин.
- 4. Объемы перетекания, формирующиеся под влиянием работы группового водозабора, непостоянны во времени в связи с выявленными тенденциями изменения водопотребления.

5. Режим эксплуатации водозабора оказывает существенное влияние на состав подземных вод, подаваемых на вход технологической цепочки обработки воды перед подачей потребителю, и должен учитываться при выборе оптимального режима работы очистных сооружений (частота включения фильтров в режим промывки, частота замены фильтрующего материала).

Заметим, что проект очистных сооружений является неотъемлемой частью подсчета запасов подземных вод и разрабатывается по исходному химическому составу, полученному на стадии разведочных работ, т.е., как правило, до начала работы водозабора. Результаты выполненного исследования показывают, что без физико-химического прогноза эволюции гидрогеохимической обстановки эксплуатационного водоносного комплекса невозможно полноценно учесть особенности изменения химического состава подземных вод в процессе перспективной работы водозабора.

- 1. Гаев А.Я., Савилова Е.Б. Об обеспечении экологической безопасности водозаборов хозяйственнопитьевого назначения нефтедобывающих районов оренбуржья // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25, № 2. С. 294–305.
- 2. Покровский Д.С., Дутова Е.М., Балобаненко А.А., Покровский В.Д., Рехтин А.Ф. Гидрогеоэкологические условия водоснабжения населения юга Сибирского региона // Вестник Томского государственного университета. 2014. № 384. С. 189-197.
  - 3. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. М.: Центр. ЛИТНефтеГаз, 2012.
- 4. Фи Т.Х., Строкова Л.А. Типизация грунтовых толщ территории города Ханой (Вьетнам) при изучении оседания земной поверхности при водопонижении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 4. 6-17. С. 6–15.
- 5. Paufler S., Grischek T., Feller J., Herlitzius J., Kulakov V.V. Manganese release linked to carbonate dissolution during the start-up phase of a subsurface iron removal well in Khabarovsk, Russia // The science of the total environment. 2019. V. 650. P. 1722–1733.
- 6. Lin M., Biswas A., Bennett E.M. . Identifying hotspots and representative monitoring area of groundwater changes with time stability analysis // Cience of The Total Environment. 2019. V. 667. P. 419–426.
- 7. Balobanenko A.A., L'Gotin V., Dutova E.M., Nikitenkov A.N., Raduk I.V., Pokrovsky D.S. Geochemical groundwater peculiarities of paleogene sediments in the Western Siberia artesian basin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016.
- 8. Дутова Е.М., Покровский Д.С., Парначев В.П., Покровский В.Д. Геохимические особенности подземных вод хозяйственно-питьевого назначения республики Хакасия // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 394. С. 239–249.
- 9. Dobosy P., Vizsolyi C. É., Varga I., Varga J., Láng G., Záray G. Comparative study of ferrate and thermally activated persulfate treatments for removal of mono- and dichlorobenzenes from groundwater // Microchemical Journal. 2018. V. 136. P. 61–66.
  - 10. Труфанов А.И. Формирование железистых подземных вод. М.: Стройиздат, 1987. 133 с.
- 11. Sung W., Morgan J.J. Kinetics and product of ferrous iron oxygenation in aqueous systems // American Chem. Soc. 1980. V. 14. P. 561–568.
- 12. Кулаков В.В. Водоподготовка питьевых вод в водоносном горизонте на тунгусском водозаборе некондиционнных подземных вод в Хабаровске // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 2. С. 87–97.
- 13. Dutova E., Nalivaiko N., Kuzevanov K., Pokrovsky V., Vologdina I., Pokrovsky D. Hydrogenous mineral neoformations in Tomsk water intake facility from underground sources // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016.
- 14. Усова Н.Т., Лукашевич О.Д., Герб Л.В., Гончаров О.Ю. Утилизация отходов водоподготовки станций обезжелезивания // Водоочистка. 2012. № 2. С. 33–40.
- 15. Туров Ю.П., Пирогова И.Д., Гузняева М.Ю., Ермашова Н.А.Органические примеси в природных водах в районе г. Стрежевого // Водные ресурсы. 1998. Т. 25, № 4. С. 455–461.

### ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ РАЗРЕЗА И КАЧЕСТВО СУБМАРИННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ОХОТОМОРСКОГО РЕГИОНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-494-498

#### Кулаков В.В.

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, vvkulakov@mail.ru

**Аннотация.** Выполнена гидрогеологическая стратификация разреза субмаринных гидрогеологических структур Охотоморского региона. Охарактеризованы особенности химического состава субмаринных подземных вод и разгрузки термальных вод в придонные воды моря.

**Ключевые слова:** гидрогеологическая стратификация, состав субмаринных подземных вод, Охотоморский регион.

**Abstract.** Hydrogeological stratification of the section of submarine hydrogeological structures of the Okhotsk Sea region was carried out. The features of the chemical composition of submarine groundwater and the discharge of thermal waters into the bottom waters of the sea are characterized.

Key words: hydrogeological stratification, composition of submarine groundwater, Okhotsksea region.

Глубинное строение Охотоморского региона отличается от сопредельных континентальных и океанических областей, кора которых характеризуется сравнительно ровным рельефом поверхности Мохоровичича и толщиной для континента в среднем 35–45 км и океана 6–10 км. Земная кора переходной зоны, в которую входит Охотское море, отличается сильно дифференцированной мощностью от 10 до 40 км, сложным рельефом поверхности Мохоровичича [3, 11]. Разломы проникают вплоть до подошвы литосферы ( $\approx$ 100 км) и являются зонами, по которым происходит скольжение океанических плит.

Основную площадь морского дна Охотского моря занимают мезокайнозойские отложения чехла, сложенного осадочными, частично вулканогенно-осадочными породами позднемелового—кайнозойского возраста. Складчатый (акустический) фундамент, который выступает из-под чехла в пределах отдельных морфоструктур, представлен осадочными, магматическими и метаморфическими породами различного состава и возраста. Акустический фундамент вскрыт двумя скважинами — Магаданской-1 [1] и Новиковской (рисунок).

Вулканогенные породы подразделяются на позднеюрско-меловые, слагающие фундамент, и кайнозойские, отражающие этапы тектономагматической активизации в период формирования впадины Охотского моря. Осадочный чехол выполняет отдельные глубоководные впадины, его мощность достигает 12 км (впадина Дерюгина).

В основании осадочного чехла Охотоморского гидрогеологического региона залегает сложно построенная по составу и возрасту толща пород, представляющая акустический фундамент, который вскрыт двумя скважинами — Магаданской-1 [1] и Новиковской. В пределах Охотоморского гидрогеологического региона верхний гидрогеологический этаж сложен отложениями Охотоморской неоплатформенной плиты [3, 11].

Среди субмаринных гидрогеологических структур в пределах Охотоморской плиты выделяются субмаринные бассейны осадочного чехла (артезианские бассейны), субмаринные массивы трещинных и трещинно-жильных вод (гидрогеологические массивы), субмаринные вулканогенные бассейны, подводные и островные (рисунок).

Субмаринные бассейны осадочного чехла, сложенные терригенными и кремнистыми кайнозойскими осадочными отложениями, различаются по их происхождению (генезису). В Охотоморском регионе выделяются крупные субмаринные артезианские бассейны котловин (Дерюгинский, Южно-Охотский и др.) и менее крупные субмаринные бассейны рифтовых впадин и трансформных разломов в пределах гидрогеологических массивов. Мощность осадочного чехла субмаринных артезианских бассейнов изменяется от 1 до 10 км и более.

Субмаринные массивы трещинных вод (гидрогеологические массивы) образуют положительные формы морского дна: валы, хребты и поднятия. Они сложены литифицированными осадочными, метаморфическими и интрузивными породами.

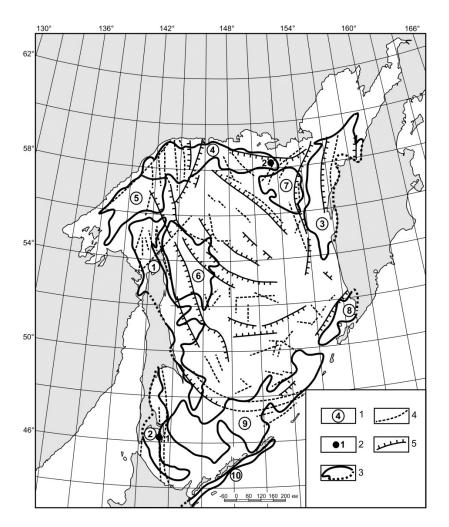


Схема гидрогеологического районирования Охотоморского региона. 1 — субмаринные артезианские бассейны (1 — Северо-Сахалинский, 2 — Южно-Сахалинский, 3 — Западно-Камчатский, 4 — Магаданский, 5 — Шантарский, 6 — Дерюгинский, 7 — Тинровский, 8 — Голыгинский, 9 — Южно-Охотский, 10 — Срединно-Курильский); 2 — параметрические скважины (1 — Новиковская, 2 — Магаданская); 3 — контур субмаринного артезианского бассейна, точками - его выход на сушу; 4 — 5 — гидрогеологические массивы и вулканогенные бассейны (4 — установленные зоны разломов; 5 — границы рифтов).

Субмаринные вулканогенные бассейны — это кайнозойские вулканогенные образования, приуроченные к рифтовым бассейнам, к продольным и поперечным разломам. На дне котловин они образуют поднятия значительных размеров, вытянутых вдоль разломов на большие расстояния. Эти вулканические постройки протягиваются вдоль юго-восточной границы Охотоморского региона, выходя выше уровня моря в виде вулканических островов (Курильские острова).

В пределах субмаринных гидрогеологических массивов и вулканогенных бассейнов, как и на суше, доминирующее развитие получают трещинно-жильные гидрогеологические системы. Геофизические данные указывают на широкое развитие в нижней части земной коры мощных и протяженных зон трещиноватости и разрывных нарушений, к которым приурочены выходы термальных подземных вод и газов.

Наиболее изученным в гидрогеологическом отношении является Северо-Сахалинский субмаринный артезианский бассейн. Он приурочен к инфильтрационной водонапорной системе, начинающейся в его субаэральной части на суше о. Сахалин.

Осадочный чехол Северо-Сахалинского субмаринного артезианского бассейна гидрогеологами-нефтяниками расчленен на пять водоносных комплексов, изученностью в той или иной мере охвачены верхние три гидрогеологических комплекса. Эти комплексы

различаются строением резервуаров, фильтрационными характеристиками пород, соленостью вод и гидродинамическим режимом [3, 11].

Первый водоносный комплекс представлен рыхлыми песчаными образованиями плиоцена и голоцена с редкими не выдержанными по площади слоями глин. Наибольшее развитие он находит в Чайвинской мегасинклинали, слагая верхнюю часть ее разреза мощностью свыше 2 км. Водоносными в составе рыхлых отложений I комплекса являются пласты разнозернистых песков и алевритов с подчиненными прослоями гравийногалечников и глин. В пределах шельфа и вниз по разрезу песчано-алевритистые разности замещаются диатомовыми глинами и глинистыми алевролитами (помырский горизонт).

Второй водоносный комплекс представлен верхнемиоценовыми отложениями средненутовской подсвиты, сложенной прибрежно-морскими терригенными осадками с преобладанием глин и алевритов. В разрезе комплекса отдельные слои песков и песчаников, глин и алевритов прослеживаются по простиранию на значительные расстояния. Водоносными являются пласты слабоуплотненных мелкозернистых песков и песчаников, мощностью от 10 до 40 м, а водоупорами служат слои алевритов, слабоуплотненных аргиллитов и глин, мощность которых в основании комплекса достигает 60 м. Данный комплекс относится к регионально проводящей толще.

Третий гидрогеологический комплекс сложен глинисто-песчаными (с преобладанием глин) отложениями нижненутовского подгоризонта и глинами окобыкайского горизонта общей мощностью до 2000 м. В составе третьего комплекса водоносными породами являются мелкозернистые и глинистые песчаники и пески нижненутовского подгоризонта. Мощность проницаемых пластов составляет 5–25, реже 30–60 м. Мощность водоупорных глинистых разделов в основном от 50 до 100 м, реже 5–15 м. В глинистой толще окобыкайской свиты встречаются подземные воды спорадического распространения, приуроченные к маломощным (от 0.5 до 2-3 м) прослоям и линзам песчаника, песка и гравия. Данный комплекс является регионально водоупорной толщей, глинистые породы которого, особенно по мере продвижения в субаквальную часть артезианского бассейна, отличаются ЛУЧШИМИ флюидоупорными качествами. А на больших тысячеметровая толща окобыкайских глин рассматривается как абсолютный флюидоупор.

Параметрическая скважина Магаданская-1 [1], пробуренная глубиной 3175 м на поднятии на южной окраине центральной части Магаданского прогиба, вскрыла весь разрез кайнозоя и вошла в акустический фундамент на отметке 2910 м. Геологический разрез акустического фундамента представлен сложно дислоцированными измененными вулканогенно-осадочными породами мелового возраста. Выше по разрезу в интервале 2510—2910 м залегает терригенная палеогеновая (эоцен—олигоцен) толща, представленная в нижней части конгломератами с прослоями аргиллитов, линзами и пропластками каменного угля, вверху — переслаиванием аргиллитов, песчаников и конгломератов.

Под морскими водами находятся различные толщи пород, которые насыщены различными по фазовому состоянию и степени связанности подземными водами. Основными типами субмаринных подземных вод являются воды иловых отложений, порово-пластовые и трещинно-пластовые воды осадочных пород, трещинные и трещинно-жильные воды эффузивов, метаморфических и интрузивных пород [7, 8].

Эти воды можно разделить на несколько групп, и каждая из них имеет важное значение в геодинамических процессах развития Охотоморского региона:

- 1. Седиментационные морские воды, накапливающиеся в процессе образования осадочных или осадочно-вулканогенных толщ.
- 2. Трещинно-жильные воды, которые под большим давлением проникают в недра по разрывным нарушениям. Возникновение последних связано с вулканической или тектонической деятельностью в ложе Охотского моря. Глубины проникновения трещинно-жильных вод во многом связаны с хрупкостью земной коры и в основном определяются глубиной залегания серпентинитового слоя.

- 3. С землетрясениями связано формирование трещинных и трещинно-жильных камерных подземных вод. Эти воды, насыщенные кремнеземом, являются основой формирования кварцевых жил и рудообразования.
- 4. Морская вода под давлением до 300–400 атм (зоны спрединга) проникает на значительные глубины по зонам тектонических нарушений.

Наибольшее развитие имеют поровые воды донных осадков и отложений. Подчиненным распространением пользуются трещинные воды — в коре выветривания консолидированных пород и трещинно-жильные воды крупных разрывных нарушений [4–6].

Практически все терригенные породы осадочного чехла с увеличением глубины залегания в разрезе артезианского бассейна теряют поровые емкостные свойства [2]. Под воздействием тектонических сил возникают трещинные и каверно-трещинные гидравлически изолированные емкости. По мере заполнения емкостей флюидами пластовые давления будут возрастать до выравнивания их с внутрипоровыми, т.е. от аномально низких до аномально высоких.

Общим для всех гидрогеологических подразделений шельфа в акватории Охотского моря являются условия формирования химического состава субмаринных подземных вод [1, 2, 3, 6, 11]. Они обусловлены захоронением морских хлоридных натриевых вод в толщи горных пород в процессе осадконакопления (седиментационные подземные воды). Под осадочным чехлом развиты водоносные зоны трещиноватости пород разновозрастных складчатых комплексов и интрузивных массивов. Неотектоническая активность региона способствует формированию разломов в голоцене и плейстоцене и обновлению разломов, заложенных на ранних этапах геологического развития территории.

Минерализация современных морских вод находится в пределах  $30.0-34.4~\mathrm{г/дм^3}$ , что позволяет предполагать такую же минерализацию подземных вод в разрезах эоценголоценовых субмаринных терригенных водоносных комплексов артезианских бассейнов ложа Охотского моря.

Верхнемиоцен-голоценовый водоносный комплекс ( $N_2$ -Q) отличается зоной развития вод морского происхождения с концентрацией солей 27–30 г/дм<sup>3</sup>. Ионный состав этих вод хлоридный натриевый.

Для отложений нижне-среднемиоценового водоносного комплекса  $(N_I^{I-2})$  характерна зона соленых вод с минерализацией 20– $27~г/дм^3$ . Состав вод преимущественно хлоридный натриевый. Преимущественное развитие имеют подземные воды хлоридно-кальциевого типа.

В отложениях олигоцен-нижнемиоценового водоносного комплекса ( $P_3$ - $N_1$ ) с гидродинамическими условиями весьма затрудненного водообмена прослеживается дальнейшее снижение минерализации до 14 г/дм<sup>3</sup> с распространением гидрохимической зоны слабосоленых вод (14–20 г/дм<sup>3</sup>). В составе этих вод наблюдается снижение концентрации хлоридов (до 7 г/дм<sup>3</sup>) и сульфатов (до 5–10 мг/дм<sup>3</sup>) и повышение содержания гидрокарбонатов (до 2–3 г/дм<sup>3</sup>).

В Новиковской параметрической скважине № 1 на шельфе Сахалина опробован интервал 1488–1550 м, где вскрыты отложения акустического фундамента мелового возраста (брекчированные, трещиноватые и гидротермально-измененные породы с зеркалами скольжения и с крутыми углами падения). Пластоиспытателем, установленным на глубине 1491.5 м в акустическом фундаменте, получен приток пластовой подземной воды с растворенным газом и минерализацией 12.45 г/дм<sup>3</sup>.

На шельфе северной части акватории Охотского моря существуют многочисленные локальные участки опреснения морских вод, сопровождаемые повышением концентрации биофильных элементов [2]. Большей частью опресненные придонные воды содержат избыток  $P_{\text{общ.}}$ ,  $N_{\text{общ.}}$ , Si. Опреснение придонного слоя воды является прямым показателем современной разгрузки подземных вод суши на шельфе [2].

На дне Охотского моря зафиксированы локальные выходы метана, представленные двумя видами: с образованием «факелов» – гидроакустических аномалий, отражающих

потоки газовых пузырей, и без них [9, 12, 13]. Большинство факелов расположено в пределах прогибов Охотоморской плиты: Северо-Сахалинского (факелы «Николь», «Миллениум») и Дерюгинского (факелы «Гизелла», «Эрвин»).

Проявление гидротермальной деятельности практически всегда соответствует зонам пересечения рифтовых долин с наиболее крупными поперечными разломами. Во многих точках рифтовых долин в гидрогеологических массивах и вулканогенных бассейнах выявлены рециклинговые гидрогеологические системы, где морские воды по зонам разломов под большим давлением взаимодействуют с горячими вулканическими (лавовыми) камерами, в результате чего на дне Охотского моря образуются выходы термальных подземных вод и рудные постройки, обогащенные сульфидами железа, цинка или свинца (черные «курильщики») или соединения кремния и бария (белые «курильщики») [3, 10].

Температура подземных вод, разгружающихся в придонные слои, по данным замеров в источниках внутри кратеров, изменялась от 334 до 353 °C.

Наблюдалось выделение из флюида свободной газовой фазы [10]. При анализе проб высокотемпературных (до 353 °C) гидротермальных растворов обнаружено высокое содержание газов (в особенности  $H_2$ ,  $CH_4$ ). Растворы характеризуются низкими значениями рН (от 3.5) и меняющейся по площади гидротермальных полей и во времени минерализации (от 0.8 до 1.3 от солености морской воды). Крупные пузыри свободных газов, выделявшиеся в процессе разгрузки высокотемпературных растворов, свидетельствуют о наличии в недрах системы фазовой дифференциации. Современная гидротермальная разгрузка происходит в отдельных очагах среди большого количества неактивных сульфидных построек, сформировавшихся на предыдущем этапе гидротермальной деятельности.

- 1. Глотов В.Е., Глотова Л.П. Флюидогеодинамические и органогеохимические зональности в осадочных бассейнах Североохотоморского шельфа в связи с оценкой их нефтегазоносности // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 4. М.: ГЕОС, 2012. С. 137–147.
- 2. Глотов В.Е., Глотова Л.П. Химические показатели подземного водообмена в Североохотоморской прибрежной зоне // Вода: химия и экология. 2014. № 10(76). С. 24–31.
- 3. Дальневосточные моря России в 4 кн. Кн. 3: Геологическое строение и геофизические исследования / отв. ред. Р.Г. Кулинич. М.: Наука, 2007. 503 с.
- 4. Караванов К.П. Гидрогеологические системы Тихоокеанского сегмента Земли. Вып. 3. Типизация, картографирование и вертикальные ряды гидрогеологических систем. Хабаровск: ИВЭП ХНЦ ДВО РАН, 2002. 161 с.
- 5. Караванов К.П., Болдовский Н.В. Опыт выделения субмаринных подземных водоносных систем на шельфе и прилегающих акваториях // Тезисы докладов Девятого совещания по подземным водам Сибири и Дальнего Востока (Всесоюзное совещание по подземным водам востока СССР). Иркутск Петропавловск-Камчатский, 1979. С. 116–117.
- 6. Караванов К.П., Кулаков В.В. Гидрогеологические системы земного шара и подземные воды Тихоокеанского сегмента Земли // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27, № 6. С. 17–30.
- 7. Кирюхин В.А., Толстихин Н.И. Гидрогеология дна Мирового океана. Л.: Ленинградский горный институт, 1988. 104 с.
- 8. Кирюхин В.А., Толстихин Н.И. Особенности гидрогеологии Тихого океана // Геология дна Тихого океана и зоны перехода к Азиатскому континенту. Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт ДВО АН СССР, 1989. С. 202–209.
- 9. Обжиров А.И., Шакиров Р.Б. Комплексные геолого-геофизические исследования газогидратов в Охотском море // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии, вып.4. М.: ГЕОС, 2012. С. 122–136.
- 10. Судариков С.М., Каминский Д.В., Наркевский Е.В. Гидротермальные ореолы рассеяния в придонных водах Срединно-Атлантического хребта. СПб.: ФГУП «ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга», 2014. 161 с.
- 11. Тектоника и углеводородный потенциал Охотского моря / О.В. Веселов, А.Я. Ильев, В.Э. Кононов и др. Владивосток: ДВО РАН, 2004. 160 с.
  - 12. Шакиров Р.Б. Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии. М.: ГЕОС, 2018. 341 с.
- 13. Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Морфотектонический контроль потоков метана в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 1 (7). С. 31–39.

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОРЕАГЕНТНОЙ ОБРАБОТКИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН ТОМСКОГО ВОДОЗАБОРА

#### Куприянов Е.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, evgkuriyanov@mail.ru

**Аннотация.** В работе проведен анализ временной изменчивости производительности эксплуатационных скважин Томского водозабора, а также показаны изменения их производительности в результате проведения термореагентной обработки. Полученные результаты в дальнейшем, вкупе с анализом геохимических особенностей изучаемых подземных вод, не только найдут отражение в рекомендациях по эксплуатации и регенерации водозаборных скважин, но и позволят получить новые знания о минералообразовании.

Ключевые слова: кольматация, удельный дебит, термореагентная обработка.

**Abstract.** The paper analyzes the temporal variability of the Tomsk water intake wells productivity and also shows the changes in the productivity of the wells as a result of thermal treatment. In the future these results together with an analysis of the groundwater geochemical characteristics will be used not only in recommendations for the operation and regeneration of water supply wells, but will also provide new knowledge about mineral formation.

**Key words:** colmatation, specific yield, thermal treatment.

Объект изучения находится в пределах Объ-Томского междуречья и относится к Томскому месторождению питьевых подземных вод, которое является источником водоснабжения г. Томска и эксплуатируется одноименным водозабором. В настоящее время водозабор состоит из трех линий и включает в себя 184 эксплуатационных и 14 резервных скважин. Первые скважины Томского водозабора были запущены в эксплуатацию в 1973 г.

Наиболее ранние гидрогеологические исследования юго-восточной части Западно-Сибирского артезианского бассейна относятся к 1932–1936 гг. Исследования М.И. Кучина, К.В. Радугина, Ю.А. Краснова, Н.М. Богаткова, С.Г. Бейра, П.А. Удодова и других известных ученых имели большое значение для дальнейших гидрогеологических изысканий [1]. Наиболее детальные исследования района Томского Приобья пришлись на 60-е гг. XX в. Значительное влияние на дальнейшее развитие знаний o геологическом гидрогеологическом строении района оказали работы М.С. Гуревича. К середине 60-х гг. прошлого века в связи с активным освоением запасов полезных ископаемых, а также бурным развитием промышленности Кемеровской и Новокузнецкой областей возник острый дефицит чистой питьевой воды для водоснабжения населения г. Томска. В связи с этим в начале 60-х гг. съемочной партией Томской комплексной геологоразведочной экспедиции была проведена специализированная гидрогеологическая съемка, по результатам которой прогнозные ресурсы подземных вод палеогенового водоносного комплекса на территории Обь-Томского междуречья были оценены как неперспективные (5 тыс. м<sup>3</sup>/сутки). Анализ этих материалов, а также материалов по водности данного гидрогеологического комплекса на Кузовлевском участке и гидрогеологической ситуации Обь-Томского междуречья позволил сотруднику Томского политехнического института (ТПИ) Н.М. Рассказову в 1965 г. переоценить прогнозные запасы подземных вод на площади междуречья и обосновать их в количестве 300 тыс. м<sup>3</sup>/сутки на срок в 10000 суток (27 лет) [2]. Предварительная разведка полностью подтвердила расчеты запасов вод, выполненные Н.М. Рассказовым, поэтому исследователями-первооткрывателями Томского месторождения питьевых подземных вод были названы сотрудники кафедры гидрогеологии ТПИ Н.М. Рассказов, Б.В. Плотников, П.А. Удодов, получившие дипломы первооткрывателей [3].

Подземные воды эксплуатируемого палеогенового комплекса являются пресными (среднее значение минерализации 476 мг/л), слабокислыми или слабощелочными (pH = 6.2– 8.0), жесткими (5–7 мг-экв/л), гидрокарбонатными кальциево-магниевыми [4]. Подземные воды, в целом, характеризуются малыми содержаниями хлоридов (до 10 мг/л), они

практически являются бессульфатными. Воды обогащены железом ( $Fe_{\text{общ.}} = 0.9-17.0 \text{ мг/л}$ ). Кроме того, наблюдается превышение марганца, иногда кремния, недостаток фтора [5].

В процессе эксплуатации на фильтрах и в прифильтровых зонах водозаборных скважин неминуемо происходит отложение кольматирующих новообразований. Связано это в большей степени с различными проявлениями химической и биологической кольматации. Как правило, результат этих проявлений — снижение водопритока к скважине, а также изменение химического состава добываемых подземных вод [6]. В составе таких новообразований, появляющихся не только на фильтрах скважин, но и на водоподъемном оборудовании, а также гравийной обсыпке, главным образом гидроокислы железа [6], а также железомарганцевые бактерии [7].

Термореагентную обработку скважин с целью увеличения к ним водопритока, а значит и их дебита, начали проводить на Томском водозаборе с 2000 г. Суть ее заключается в воздействия на фильтр и прифильтровую зону скважины реагентов, растворяющих кольматирующие новообразования [8]. В фильтр скважины подается растворенный в воде реагент. В качестве реагента используется бисульфат натрия (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). В течение 4–6 час. раствор нагревают до оптимальных температур и далее производят замер его температуры на протяжении всего процесса. Приблизительное время нахождения раствора в скважине составляет 5–7 час. Затем сжатым воздухом раствор задавливают за контур фильтра. В завершении скважину прокачивают, тем самым удаляя из нее остатки раствора.

Водоприемная часть фильтровых колонн изучаемых водозаборных скважин представляет собой фильтры с проволочной обмоткой на перфорированном каркасе с гравийной обсыпкой [9]. Длина фильтра на рассматриваемой нами первой линии водозабора составляет от 15 до 20 м.

На примере двух групп водозаборных скважин Томского водозабора, термореагентная обработка на которых проводилась неоднократно, можно проследить изменение их удельных дебитов на протяжении длительного периода времени в связи с отложением кольматирующих образований. На рис. 1 представлен график изменения удельных дебитов водозаборных скважин № 15 и 33.

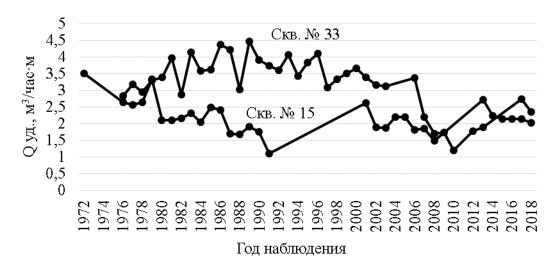


Рис. 1. Изменение удельного дебита скважин № 15 и 33 Томского водозабора.

Скважина № 15 была запущена в эксплуатацию в 1972 г. Не эксплуатировалась на протяжении длительных периодов: с 1973 по 1976 г., с 1993 по 2001 г., с 2011 по 2013 г. Впервые термореагентная обработка на этой скважине была произведена в 2001 г., в результате удельный дебит скважины увеличился на 134 % по сравнению с годом, предшествующим году проведения регенерации. В 2013 г. при повторном проведении регенерации удельный дебит скважины увеличился на 82 %. При проведении последней регенерации на скважине был установлен дополнительный полимерный фильтр.

Скважина № 33 была запущена в работу в 1973 г. Бесперебойно работала на протяжении 31 года. В 2013 г. была выведена из эксплуатации в ремонт и после проведения термореагентной обработки вновь заработала в 2017 г. В результате последней регенерации удельный дебит этой скважины увеличился на 45 %.

Скважины № 25 и 29 эксплуатировались с 1973 г. (рис. 2).

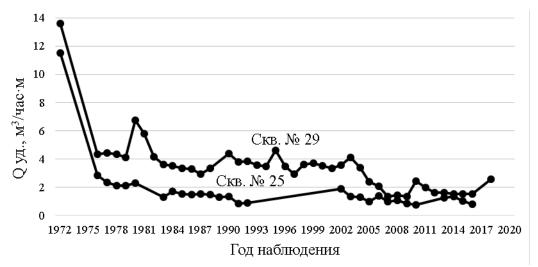


Рис. 2. Изменение удельного дебита скважин № 25 и 29 Томского водозабора.

Скважина № 25 не эксплуатировалась с 1974 по 1975 г., с 1993 по 2002 г., с 2011 по 2013 г. Подверглась термореагентной обработке трижды. В 2002 г. после проведения регенерации удельный дебит увеличился на 110 %, в 2009 г. регенерация не дала результата, а удельный дебит уменьшился по отношению к 2010 г., в 2013 г. значение удельного дебита скважины увеличилось на 67 %.

Скважина № 29 находилась в резерве с 1974 по 1976 г., с 1989 по 1990 г. и с 2017 по 2018 г. Термореагентная обработка этой скважины была произведена в 2010 г., удельный дебит увеличился на 80 %, а также в 2018 г.; к сожалению, расчеты удельного дебита в этом году не производились.

В результате проведенной регенерации значения удельных дебитов всех рассматриваемых скважин так или иначе увеличились. Но, несмотря на положительный эффект термореагентной обработки, уже через несколько лет эксплуатации удельные дебиты этих скважин снова начали снижаться. На сегодняшний день скважины № 25 и 29 выведены из эксплуатации. Судя по полученным результатам, необходимо отметить, что для достижения необходимого эффекта регенерацию необходимо проводить в среднем один раз в шесть лет. В то же время необходимо учитывать высокие затраты на проведение термореагентной обработки.

Очевидно, что при планировании и выборе метода регенерации необходимо учитывать химический состав образующихся отложений, особенности гидрогеохимической среды, а также более подробно изучить нерастворимые соединения, образующиеся в околоскважинном пространстве.

- 1. Гидрогеология СССР. Т. 16: Западно-Сибирская равнина. М.: Недра, 1970. 340 с.
- 2. Рассказов Н.М., Удодов П.А., Плотников Б.В., Санданов И.Б. Перспективы водоснабжения Томска // Материалы научно-технической конференции по охране природы Томской области. Томск: ТО ЗСКИ, 1967. С. 38–41.
- 3. Шварцев С.Л., Лукин А.А. О некоторых спорных проблемах Томского подземного водозабора // Обской вестник. 1999. № 3-4. С. 126–131.
- 4. Колоколова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора (Томская область): Дис... канд. геол.-мин. наук. Томск, 2003. 197 с.

- 5. Шварцева Н.М. Прогноз изменений химического состава подземных вод Томского водозабора // Формирование подземных вод как основа гидрогеологических прогнозов: Материалы I Всесоюзной гидрогеологической конференции. М.: Наука, 1982. С. 329–331.
- 6. Покровский Д.С., Дутова Е.М., Рогов Г.М., Вологдина И.В., Тайлашев А.С., Лычагин Д.В. Минеральные новообразования на водозаборах Томской области. Томск: Изд-во НТЛ, 2002. 176 с.
- 7. Вологдина И.В., Дутова Е.М., Покровский Д.С., Покровский В.Д., Радюк И.В. Природнотехногенные минеральные новообразования на водозаборах Томской области // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. СПб. 2015. № 3. С. 58–72.
- 8. Кармалов А.И., Филимонова С.В. Анализ причин кольматации и коррозии оборудования водозаборных скважин в условиях повышенной техногенной нагрузки // Водоснабжение и санитарная техника. М.: 2011. № 9. Т. 1. С. 16–20.
  - 9. Гаврилко В.Н. Фильтры буровых скважин, 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985. 334 с.

# ГЛУБИННОЕ ЗАХОРОНЕНИЕ ПУЛЬПООБРАЗНЫХ БУРОВЫХ ОТХОДОВ: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ ПОЛНОГО ЦИКЛА РАБОТЫ СКВАЖИНЫ ОТ ОПЫТНЫХ ЗАКАЧЕК ДО КОНСЕРВАЦИИ ОБЪЕКТА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-503-507

Курчиков Д. А.<sup>1,2</sup>, Плавник А. Г.<sup>1,2</sup>, Павленко О. Л.<sup>1</sup>
<sup>1</sup>Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, Тюмень,

<sup>2</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень kurchikov.d@mail.ru, plavnik@ikz.ru, Pavlenko Olga@tmnsc.ru

**Аннотация.** В статье приведены результаты мониторинга глубинного захоронения бурового шлама на одном из нефтегазовых месторождений Западной Сибири. Показано, что наблюдаемые резкие изменения эксплуатационных параметров свидетельствуют о периодических существенных изменениях трещинного пространства. Фиксируемые при закачке параметры позволяют проводить оперативную корректировку остаточной емкости трещинного домена.

Ключевые слова: буровой шлам, захоронение, гидроразрыв пласта, мониторинг, экология.

**Abstract.** The article presents the results of drilling activities waste deep underground injection monitoring at one of the oil and gas Western Siberia fields. The observed abrupt changes in operating parameters indicate periodic significant changes in the fracture space. Parameters fixed during re-injection make it possible to correct the assessment of the residual capacity of the fracture domain

Key words: drill cuttings, re-injection, fracking, monitoring, ecology.

Буровые отходы — основной вид отходов, образующихся при разбуривании и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, и их экологически безопасная ликвидация — одна из важнейших задач недропользователя [1, 3, 8].

С недавних пор в нашей стране практикуется подземное захоронение буровых отходов в глубокозалегающие водоносные горизонты, не содержащие залежей полезных ископаемых и имеющие достаточную емкость [2, 10, 12]. Закачка жидких буровых отходов может осуществляться традиционным методом – по аналогии с размещением попутных вод, не востребованных системой поддержания пластового давления. Для закачки же бурового шлама, представляющего собой куски выбуренной породы, производится его дробление и перемешивание с жидкостью (вода либо жидкие буровые отходы) и превращение в пульпу с определенной вязкостью. Закачка в пласт ведется с применением гидроразрыва с помощью насоса высокого давления [4, 5, 7, 9, 11]. Емкость домена, то есть трещины, образованной гидроразрывом и заполненной закачанной пульпой, – величина конечная и зависит от физико-механических характеристик пород коллектора. Закачка в каждый конкретный объект прекращается после того, как давление закачки достигнет определенной заранее предельной величины.

Для обеспечения оптимальности режима эксплуатации и безопасности глубинной закачки пульпообразных буровых отходов требуется постоянный мониторинг и проверка рабочих характеристик этого процесса. Это необходимо для предотвращения неконтролируемого роста трещины за границы эксплуатационного объекта с образованием гидродинамической взаимосвязи с соседними скважинами или выхода трещины к зонам тектонических нарушений. Мониторинг давлений закачки, скорости закачки и контроль постоянства реологических свойств пульпы являются ключевыми составляющими долгосрочной надежности работы поглощающей скважины.

Ввиду незначительного опыта и крайне низкой степени распространенности подземного захоронения пульпообразных буровых отходов в России практически отсутствуют какие-либо исследования с анализом опыта проведения подобных работ и их материалов. В настоящей работе представлены результаты обработки и интерпретации основных показателей мониторинга полного цикла закачки шлама в поглощающую скважину на одном из нефтяных месторождений Западной Сибири, начиная с тестовых

закачек и заканчивая консервацией скважины спустя несколько лет почти непрекращающейся эксплуатации.

Для проведения работ недропользователем было оформлено дополнение к имеющейся лицензии на право пользования недрами с целью геологического изучения, разведки и добычи углеводородного сырья, поисков и оценки пластов-коллекторов для закачки промышленных и хозяйственно-бытовых стоков, позволяющее проводить геологическое изучение для последующей закачки буровых отходов.

На основе изучения геологического строения разреза и физико-механических характеристик пород поглощающий объект был выделен в толще неокомских отложений в (-1500...-1600)-(-1800...-1900)Водоносные M. пласты представлены неравномерным чередованием песчано-алеврито-глинистых перекрытых пород, региональным водоупором – глинами верхнеалымской подсвиты и чернореченской пачки суммарной мощностью до 80 м, в подошве залегает глинистая покачевская пачка мощностью 20 м. Коэффициент пористости коллектора составляет порядка 0.22, проницаемость – 70– 80 мД. Пластовое давление – нормальное гидростатическое, на глубине 1775 м составляет 180 атм. Горное давление на уровне поглощающего горизонта – 350–400 атм.

Предварительно оцененная емкость объекта составила 40 000 м<sup>3</sup> твердой фазы при максимально допустимом устьевом давлении нагнетания в 230 атм.

В соответствии с лицензионными условиями и проектом геологического изучения недр на участке проводились длительные опытно-промышленные закачки буровых отходов, их результаты были изложены в геологическом отчете, который получил положительное заключение государственной геологической экспертизы. После этого была оформлена лицензия на право пользования недрами для захоронения буровых отходов, и участок был переведен на этап промышленной эксплуатации.

Первичными отчетными документами по закачке пульпы являются ежедневные отчеты с ежесекундными замерами давления и дебита закачки, а также ежедневные сводки, в которых для каждого периода закачки фиксировались продолжительность работы, закачанный объем, начальные, средние и конечные значения давления нагнетания. Для последующего использования большого объема разнородной информации нами проведена ее корректировка на основании сравнительного анализа имеющихся данных.

Полный цикл работы скважины на объекте продолжался 33 месяца. Основные показатели работы скважины характеризуются высокой стабильностью. Дебиты закачки пульпы практически постоянны и составляют 40 м³/ч. Однако следует учитывать, что используемая технология предусматривает остановки на приготовление следующих порций пульпы и отстаивание скважины, поэтому фактический мгновенный дебит закачки отличается от суточного объема: закачка среднего за весь период работы скважины объема 488 м³ пульпы за сутки обеспечивалась мгновенным дебитом около 960 м³/сут.

В сутки осуществлялось от 1 до 14 закачек подготовленных порций пульпы. Средняя продолжительность одной закачки составляла 95 мин, и за это время закачивалось около 56 м³ шламовой пульпы. Суммарный фактический объем закачки пульпы составил 397.8 тыс. м³ со средним содержанием твердой фазы 12 %.

Использование методов интерпретации стандартных гидродинамических неустановившихся режимах позволяет на оценить изменчивость фильтрационных свойств (водопроводимости) коллектора в длительном процессе закачки пульпы. Для этого нами выполнен анализ данных наблюдений давления во времени в период закачки и остановки. Опыт показывает, что применение стандартных методов оценки коэффициента водопроводимости с помощью анализа кривых восстановления давления данных ПО закачке ПУЛЬПЫ затруднено сложностью гидродинамических процессов. В связи с этим нами был выбран более схематичный подход, основанный на представлении о наличии общих закономерностей между фильтрационными показателями коллекторов, перепадами давления на режимах закачки и остановки, продолжительностью этих режимов и дебитом скважины [6]. Такая закономерность

определяется формулой изменения уровня во времени для однородного безграничного пласта (уравнение Тейса-Джейкоба).

В динамике изменения давлений прослеживаются общие черты, однако среднее давление закачки заметно выше остальных, а давление остановки закачки имеет промежуточный вид в отношении вариативности данных. Линия тренда, проведенная по данным средних давлений закачки, отражает общую тенденцию к медленному росту давлений (рис. 1, a), что, вероятно, обусловлено постепенным ухудшением фильтрационноемкостных свойств трещины за счет заполнения ее шламовыми частицами.

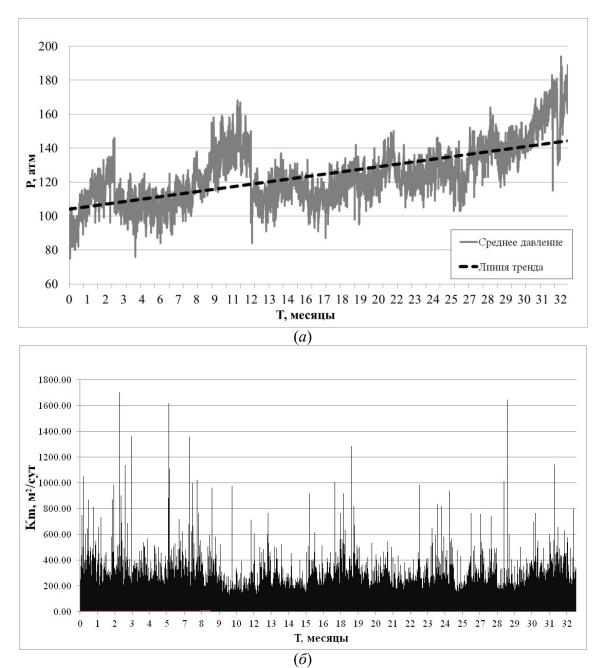


Рис. 1. Изменение среднего давления закачки пульпы (a) и коэффициента водопроводимости коллектора  $(\delta)$ .

Среднее давление начала закачки на начальном этапе работы полигона составляло около 40 атм, давление окончания закачки — около 65–70 атм, среднее давление закачки — 95–100 атм. На протяжении закачки фиксируются периоды понижения давлений, которые характеризуют изменения фильтрационно-емкостных свойств объекта. На конечном этапе

закачки среднее начальное давление составляло 100–120 атм, давление окончания закачки – около 120–130 атм, среднее давление закачки достигало 194 атм.

Среднее значение коэффициента водопроводимости (рис. 1,  $\delta$ ) в течение всего периода закачки составляет около 239 м²/сут, можно отметить лишь незначительное его снижение от 240 м²/сут (в среднем на начальном этапе) до 237 м²/сут (в среднем на конечном этапе). На этом фоне происходит ухудшение стабильности фильтрационно-емкостных свойств коллектора: частота аномально высоких значений коэффициента водопроводимости (более 800 м²/сут) на конечном этапе в разы меньше. А это, очевидно, есть отражение изменения параметров трещинного домена эксплуатируемого объекта.

Процесс закачки пульпы фактически представляет собой растянутый во времени процесс гидроразрыва пласта, сопровождающийся закачкой в него расклинивающей твердой фазы. При этом непостоянство самой закачки может рассматриваться как некоторая флуктуация относительно среднего значения, что не вносит существенного изменения в полуколичественные методы интерпретации результатов наблюдений.

В соответствии с этим одним из вариантов обработки накапливаемых данных является построение и последующий анализ зависимости от времени средних значений давлений нагнетания в процессе закачки пульпы в билогарифмических масштабах (график Нолте — Смита) [13, 14]. В качестве условной временной шкалы удобно использовать величину накапливаемого объема твердой фазы. Это вполне оправдано тем, что закачки осуществляются достаточно равномерно во времени, и при этом графики Нолте — Смита не претерпевают принципиальных изменений (в силу логарифмического масштаба при этом просто сдвигается нулевая отметка оси абсцисс). С другой стороны, при таком построении можно отметить целевые показатели работы поглощающей скважины — максимальное давление нагнетания и ожидаемый объем закачки в пласт твердой фазы — и отслеживать соответствие динамики работы скважины условиям обеспечения требуемых показателей.

Результаты соответствующего сопоставления изменения среднего давления отдельных циклов закачки с накапливаемым объемом закачанной твердой фазы в целом за период наблюдений приведены на рис. 2. На этом же рисунке приведены значения предельно допустимого давления закачки (230 атм) и проектного объема закачки твердой фазы  $-40\,000\,\mathrm{m}^3$ .

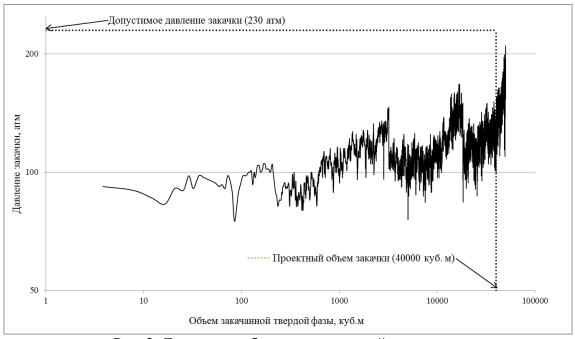


Рис. 2. Динамика работы поглощающей скважины.

В ходе закачки наблюдаются периоды роста давлений, которые сменяются их резкими кратковременными понижениями. Такое поведение давления свидетельствует о сложном характере развития трещины, когда ее рост в глубь пласта сменяется процессами роста трещины в высоту с последующим длительным периодом развития вторичной трещиноватости, переходящим в новый цикл развития трещины в длину, завершающийся скачкообразным ростом трещины в высоту [6].

Проектный объем закачки твердой фазы -40 тыс.  $м^3$  — был достигнут на 27-м месяце работы полигона, когда среднее давление составляло 165 атм. Еще через 5 месяцев, после превышения величины в 200 атм, закачка была остановлена, объект законсервирован. Суммарный объем закачанной твердой фазы — 48.6 тыс.  $м^3$  — на 20 % превысил первоначально оцененный объем домена.

Таким образом, фактический объем закачки бурового шлама может превосходить проектное значение, и в ряде случаев значительно. Фиксируемые при работе полигона подземного захоронения пульпообразных буровых отходов параметры закачки позволяют проводить оперативную корректировку геомеханической модели, при этом остаточная емкость домена может как увеличиваться по сравнению с первоначально оцененной, так и уменьшаться, что соответственно определяет остаточное время работы поглощающей скважины. Это говорит о необходимости проведения исследований, направленных на детальный контроль и анализ условий формирования трещинного пространства в процессе подземного захоронения бурового шлама, и учета полученных результатов при проектировании работ на других объектах.

#### Список литературы

- 1. Базанов В.А., Савичев О.Г., Волостнов Д.В., Егоров Б.А., Крутовский А.О., Язиков Е.Г. Влияние шламовых амбаров на геохимическое состояние болотных экосистем в бассейне реки Васюган // Известия Томского политехнического университета, Инжиниринг георесурсов. 2004. 307 (2). С. 72–75.
- 2. Гаев А.Я. Подземное захоронение сточных вод на предприятиях газовой промышленности. Л.: Недра, 1981. 167 с.
- 3. Гихен Т., Гилмор А., Го Г. На острие проблемы утилизации буровых отходов // Нефтегазовое обозрение. 2006. Т. 18. М4. С. 64–79.
- 4. Каневская Р.Д. Математическое моделирование разработки месторождений нефти и газа с применением гидравлического разрыва пласта. М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 1999. 212 с.
- 5. Карпова О.М., Ганиев Б.Г., Гумаров Н.Ф. Об использовании гидроразрыва пласта на добывающем фонде скважин на поздней стадии разработки Ромашкинского месторождения // Георесурсы. 2012. М 3 (45). С. 51–54.
- 6. Курчиков А.Р., Плавник А.Г., Курчиков Д.А. Гидродинамический мониторинг подземного захоронения шламовых отходов эксплуатационного бурения // Нефтепромысловое дело. 2016, № 3. С. 35—40
  - 7. Меликбеков А.С. Теория и практика гидравлического разрыва пласта. М.: Недра, 1961. 141 с.
- 8. Скипин Л.Н., Галямов А.А., Гаевая Е.В., Захарова Е.В. Техногенное воздействие шламовых амбаров на окружающую среду полуострова Ямал // Вестник КрасГАУ. 2014. №11. С. 146–150.
  - 9. Усачев П.М. Гидравлический разрыв пласта. М.: Недра, 1986. 165 с.
- 10. Чепрасов А.В., Трегуб А.И. Структурная анизотропия нефтегазовых месторождений и утилизация бурового шлама // Вестник ВГУ, серия Геология. 2009. № 2. С. 191–194.
- 11. Черевко М.А., Янин К.Е. Первые результаты применения многостадийных гидроразрывов пластов в горизонтальных скважинах Приобского месторождения // Нефт. хоз-во. 2015. № 2. С. 74–77.
- 12. Чесноков А. "Газпромнефть": впервые в России закачка шлама в пласт на суше // Oil & Gas Eurasia. 2009. № 3. С. 34—38.
- 13. Экономидис М., Олайни Р., Валько П. Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта. Наведение мостов между теорией и практикой. М.: Петро Альянс, 2004. 306 с.
- 14. Economides M.J., Nolte K.G. Reservoir Stimulation. 3rd Edition. Chichester: John Wiley and Sons, 2000. 856 p.

#### ПРОБЛЕМЫ ПОДТОПЛЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-508-512

Ланкин Ю.К., Наумова О.О.

Иркутский территориальный центр государственного мониторинга геологической среды AO «Росгео», Yur-lankin@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются проблемы подтопления населенных пунктов Иркутской области, выявленные в процессе собственных исследований, а также мониторинг подземных вод, проводимый Иркутским территориальным центром с 2002 по 2020 г. Дается характеристика условий возникновения подтопления населенных пунктов Иркутской области, а также мероприятий по ликвидации или уменьшению развития этого негативного экзогенного геологического процесса.

Ключевые слова: подтопление, подвешенные подземные воды, верховодка.

**Abstract.** The problems of flooding of settlements of the Irkutsk region, identified in the course of their own research, including monitoring of groundwater, carried out by the Irkutsk territorial center from 2002 to 2020, are considered. The characteristics of the conditions for the occurrence of flooding of urbanized territories and various municipalities, as well as measures to eliminate or reduce the development of this negative exogenous geological process are given.

Key words: flooding, suspended underground waters, upper layer of ground water.

В результате многолетних исследований и мониторинга подземных вод, проводимых Иркутским территориальным центром государственного мониторинга геологической среды, установлено, что практически на всех урбанизированных территориях Иркутской области и во многих сельских поселениях периодически или постоянно проявляется негативный процесс подтопления. Проявляться этот экзогенный геологический процесс может как за счет естественных природных факторов, так и в результате инженерной деятельности человека.

Кратковременные явления подтопления, вызванные естественными природными причинами, преимущественно возникают в долинах рек и связаны с паводками. В таких условиях, по опыту работ, прогноз подтопления наиболее рационально производится лишь в сочетании с прогнозом затопления территорий. Эти задачи должны решать совместно гидрологи и гидрогеологи при наличии подробной топографической основы затапливаемых и подтапливаемых территорий. Другие явления подтопления, вызванные естественными природными причинами, в процессе геологоразведочных работ на территории Иркутской области не установлены.

По имеющимся материалам явления подтопления массово наблюдаются за пределами зон затопления паводками, часто на площадях по абсолютным отметкам земной поверхности значительно выше не только регионального, но и местного базиса дренирования. Этот негативный процесс развивается за счет подземных вод. В нем могут участвовать как грунтовые воды основного водоносного горизонта (зона полного водонасыщения), так и воды зоны аэрации (неполного водонасыщения). Все обследованные очаги подтопления подземными водами вызваны инженерной деятельностью человека.

Явления подтопления, обусловленные подземными водами зоны полного водонасыщения, встречаются крайне редко. Они вызваны колебаниями уровня грунтовых вод. В естественных условиях на площадях при близком уровне грунтовых вод к поверхности земли обычно жилая застройка не размещается.

Примером подтопления, связанного с колебанием уровня подземных вод, является центральная часть г. Иркутска (район цирка, сквер Кирова и т.д.), расположенная на надпойменной террасе р. Ангары. Эта часть города не имеет эффективной централизованной системы водоотведения атмосферных осадков. Однако аллювиальные отложения надпойменной террасы характеризуются высокими фильтрационными показателями, и поэтому инфильтрация осадков в грунтовый горизонт происходит в кратчайший срок, не вызывая подтопление жилой застройки в зоне аэрации. Поток грунтовых вод направлен в сторону р. Ангары. Ложе реки имеет высокое гидравлическое сопротивление. Это хорошо

прослеживается как по результатам инженерных изысканий, так и по режимным наблюдениям, по скважинам, расположенным на берегу реки. Здесь отмечается превышение уровня грунтовых вод относительно речных до метра и более. В связи с отсутствием эффективной системы водоотведения атмосферных осадков и высоким гидравлическим сопротивлением ложа р. Ангары за несколько десятков лет в центральной части г. Иркутска произошло поднятие среднегодового уровня подземных вод и подвальные помещения, которые были сухими в середине прошлого столетия, оказались подтопленными грунтовыми водами. Борьба с таким явлением подтопления экономически нецелесообразна. В данных условиях возможно лишь сооружение подвалов с хорошей гидроизоляцией.

В зоне аэрации подтопление жилой застройки происходит за счет подвешенных подземных вод и верховодок. Проблема возникновения таких явлений обусловлена плохой инженерной подготовкой территорий, связанной с нерациональной планировкой рельефа, неэффективной системой водоотведения атмосферных осадков или ее отсутствием.

Подвешенные подземные воды образуются просачивающимися атмосферными осадками, выпадающими на участках слабопроницаемых грунтов, не имеют водоупора и удерживаются в грунте капиллярным натяжением. В конечном итоге они сохраняются определенное время в зависимости от фильтрационных параметров водовмещающих пород и в дальнейшем просачиваются к водоносному горизонту. Образование таких вод определяется состоянием поверхности рельефа, организацией стока и благоустройством территорий.

Подтопление, связанное с подвешенными водами, может происходить на территориях с любым геологическим строением зоны аэрации, при наличии толщи элювиально-делювиальных глинистых отложений мощностью от нескольких метров. Основным фактором формирования подвешенных вод является нерациональная планировка рельефа, когда в населенном пункте образованы замкнутые понижения земной поверхности, где происходит локализация атмосферных осадков. Часто в таких условиях уже экономически не целесообразна организация водоотведения, поэтому производится расселение жителей из очагов подтопления.

Явления подтопления, обусловленные подвешенными водами, наблюдались в таких городах, как Иркутск, Усолье-Сибирское, Черемхово, Зима, Куйтун, Тулун, Братск, Тайшет, и во многих мелких муниципальных образованиях.

Наиболее показательными являются г. Тайшет и пос. Куватка (Братский район).

Обследование г. Тайшета выполнено в сентябре 2020 г. Работы проведены лишь в западной части города. Подтопленной оказалось около 30 % территории. В процессе обследования замерялись уровни воды в подпольях, колодцах и водозаборных скважинах, а также производился осмотр кюветов дорог. На участках подтопления в пониженных частях рельефа уровень воды наблюдался на поверхности земли. В подпольях и колодцах он находился на глубине от 0.0 до 1.0–1.5 м. На возвышенных участках рельефа подтоплены были лишь подполья на глубине до 2.0-2.5 м. В колодцах также уровень воды был зафиксирован на глубине до 2.5 м. Повсеместно в водозаборных скважинах, вскрывших коренные породы, уровень подземных вод основного грунтового горизонта фиксировался на глубине от 6 до 20 м, в среднем до 10 м. По сведениям местных жителей подтопление водой подпольев, огородов и подворьев домов не является постоянным, а зависит от осадков и снеготаяния. На основании результатов обследования были сделаны выводы, что подтопление происходит за счет подвешенных вод зоны аэрации в слабопроницаемых глинистых рыхлых отложениях. Это связано с тем, что в период, когда осуществлялась застройка территорий, не была предусмотрена организация эффективного атмосферных осадков, основной задачей которой является сбор и удаление с площади населенного пункта дождевых, ливневых и талых вод путем вертикальной планировки территории застройки. Этот факт является определяющим в формировании подвешенных подземных вод и развитии негативного процесса подтопления городской застройки.

Обследование пос. Куватка выполнено в июле 2007 г. На момент проведения работ были подтоплены подвалы и подполья в 88 домах (150 квартир), что составило 50 % от всей территории поселка. Тем не менее в водозаборных скважинах уровень основного грунтового горизонта был зафиксирован на глубине 50 м. По сведениям местных жителей, вода в подпольях и подвалах временно исчезала только к весне, а затем опять появлялась. На основе результатов литологического анализа рыхлых отложений было установлено, что подтопление наблюдается лишь на участках, сложенных рыхлыми глинистыми элювиальноделювиальными отложениями мощностью до 5-7 м, представленными суглинками. На участках, где рыхлые отложения состоят из песка, явления подтопления не наблюдались. Населенный пункт расположен на пологом склоне Братского водохранилища. Система водоотведения атмосферных осадков на момент обследования состояла из кюветов (канав) глубиной до одного метра, преимущественно расположенных по простиранию склона, что способствовало растеканию поверхностных вод (атмосферных осадков). Кюветы по падению склона на момент обследования практически отсутствовали. Кроме того, большинство жилых домов не имели водостоков, которые отводили бы атмосферные осадки в ближайшие кюветы. Таким образом, на территории населенного пункта происходила локализация атмосферных осадков, формировались подвешенные подземные воды, возникали явления подтопления.

Верховодка представляет собой просачивающиеся с поверхности земли атмосферные задерживающиеся на отдельных линзах И пластах водоупорных или слабопроницаемых пород на сравнительно небольших глубинах. Грунтовые воды верховодки формируются в период дождей или таяния снега, имеют непостоянный уровень вследствие постепенного просачивания через слабопроницаемые грунты или разгрузки воды по склонам. Образование верховодок во многом зависит от организации поверхностного стока и общего благоустройства территорий населенных пунктов. Явления подтопления за счет верховодок имеют наибольшее распространение в пределах юрских отложений. Континентальные мезозойские образования представляют собой неоднородную по литологическому составу толщу с переслаивающимися проницаемыми, слабопроницаемыми или водоупорными породами. Разнородные по литологии пласты могут быть выдержанными или не выдержанными как по разрезу, так и по горизонтали. Процесс подтопления, обусловленный верховодками, может быть весьма длительным по времени.

Явления подтопления, обусловленные верховодками, прослеживались в городах Иркутск, Черемхово, Зима, Куйтун, Тулун, Нижнеудинск и во многих мелких муниципальных образованиях. Наиболее ярко явления подтопления наблюдались в г. Куйтуне. Он был обследован в сентябре 2019 г.

В геологическом отношении г. Куйтун расположен в поле распространения юрских отложений мощностью до 200-250 м. Сверху разрез сложен породами присаянской свиты мощностью около 80 м. Они представлены песчаниками, алевролитами, аргиллитами и прослоями углей. Часто различные литологические разности залегают в виде чередующихся линз. При залегании пород в виде пластов наблюдается весьма существенная изменчивость их мощности. Фильтрационные свойства отложений присаянской свиты неоднородны. Аргиллиты обладают самыми низкими коэффициентами фильтрации – 0.01–0.0001 м/сут. Часто они являются водоупорными. Наибольшими фильтрационными свойствами обладают песчаники. Их коэффициент фильтрации превышает единицы и первые десятки метров в сутки. По водозаборным скважинам, в зависимости от рельефа, глубина залегания уровней подземных вод основного водоносного горизонта (зона полного водонасыщения) изменяется от 10-15 до 70-80 м. За счет неоднородных фильтрационных свойств в зоне аэрации формируются верховодки. Они имеют спорадическое распространение, могут существовать временно или постоянно, что зависит от условий питания атмосферными осадками. Часто верховодки разгружаются в отрицательных формах земной поверхности (логах, распадках) в виде родников, мочажин и заболоченностей.

Сверху коренные (скальные) породы юрского возраста являются выветрелыми (элювий) до песков, суглинков и глин, которые на склонах частично перемещены вниз (делювий, пролювий). Мощность рыхлых отложений изменяется от 3–5 до 10–15 м. Сложение их слоистое. За счет инфильтрации атмосферных осадков пески насыщаются водой, возникают верховодки в рыхлых отложениях. Вода из песков при их вскрытии может поступать в подвалы и подполья, вызывая процесс подтопления (такие случаи зафиксированы во время обследования). При расположении колодцев на склонах и питании песков в верхних частях склонов уровень воды может подняться до уровня земли и выше, вызывая разгрузку на поверхность рельефа (наблюдалось во время обследования).

По результатам выполненных исследований установлено, что подтопление в г. Куйтуне не связано с подземными водами основного водоносного горизонта. Застроенная территория расположена в поле распространения рыхлых отложений и коренных пород, имеющих весьма неоднородный состав и фильтрационные свойства, что затрудняет ее дренирование. Процесс подтопления развивается на поверхности земли и в зоне аэрации на водоупорных грунтах при насыщении пород с хорошими фильтрационными показателями. Это обусловлено нерациональной инженерной подготовкой застроенной территории, что способствует локализации атмосферных осадков на участках подтопления с образованием луж (временно) и заболоченностей на поверхности земли, а также верховодок в зоне аэрации. Для снижения и ликвидации явлений подтопления необходима эффективная и рациональная организация стока поверхностных (атмосферных) вод, а также дренажа длительное время существующих верховодок (на участках заболоченностей).

Кроме нерациональной инженерной подготовки населенных пунктов Иркутской области, процесс подтопления наблюдался в условиях, когда он был искусственно вызван строителями или возникал на территориях добычи полезных ископаемых.

Явления подтопления, вызванные строителями, зафиксированы в г. Железногорске Илимском, а также в пос. Онот Черемховского района.

В г. Железногорске-Илимском при осуществлении жилой застройки крутого склона р. Рассохи для трехэтажных многоквартирных домов был предусмотрен головной дренаж подземных вод глубиной ниже их фундаментов. Однако он оказался в зоне аэрации. В дальнейшем дренаж соединили с ливневой канализацией. Он оказался заполненным водой, образовалась верховодка. За счет насыщения водой грунтов основания фундаментов изменились их прочностные свойства, это вызвало деформации жилых домов, один из них оказался в аварийном состоянии, был расселен и демонтирован.

В пос. Онот строителями сооружался подземный водопровод. С этой целью были вырыты вдоль улиц траншеи глубиной до 3 м от одной до другой окраины поселка. Населенный пункт расположен на левом берегу горной р. Онот со значительным уклоном русла (0.004). В траншее в верхней части по течению р. Онот началась разгрузка грунтовых вод, нижняя часть оказалась затопленной, а в колодцах, расположенных вблизи, уровень поднялся до поверхности земли, появились ручьи, подполья домов оказались затопленными. Подтопление прекратилось лишь после ликвидации траншеи.

На территориях добычи полезных ископаемых явления подтопления наблюдались в городах Черемхово и Тулуне.

В г. Черемхово в начале прошлого столетия осуществлялась подземная добыча угля. Затем определенные территории были выведены из эксплуатации и заняты под жилую застройку. На уровне местного базиса дренирования (речной сети) подземные выработки оказались затоплены. На склонах и водоразделах остались воронки от обрушенных горных выработок. В эти воронки был направлен сток атмосферных осадков с городских улиц. Через некоторое время по нижним частям склонов в разных местах стала появляться вода в виде заболоченностей, мочажин, мелких родников и подтопления жилых домов. Некоторые дома пришлось расселить и демонтировать.

В г. Тулуне в процессе эксплуатации Тулунского и Азейского угольных разрезов осуществлялся водоотлив из горных выработок. В это время южная часть города,

расположенная в зоне водоотлива, была застроена. После прекращения водоотлива уровень подземных вод поднялся и началось подтопление жилой застройки. Администрации города пришлось организовывать систему водоотведения.

В целом проблемы подтопления населенных пунктов Иркутской области связаны в первую очередь с плохой инженерной подготовкой территорий, где наблюдается этот процесс. Он развивается на участках, где могут формироваться либо подвешенные подземные воды, либо верховодка, или наблюдается их совместное сочетание. В первом случае необходимо лишь наличие толщи слабопроницаемых или водоупорных элювиально-делювиальных (или любого другого генезиса) отложений незначительной мощности (не превышающей даже 10 м) независимо от геологического строения территории. Во втором случае должна быть слоистая толща проницаемых, слабопроницаемых или водоупорных пород. Здесь на формирование процесса подтопления вполне могут оказать влияние особенности геологического строения территории. Кроме описанных выше проблем при строительстве необходимо учитывать гидрогеологические условия осваиваемых территорий, чтобы не провоцировать возникновение негативного процесса подтопления, приведенного на примере городов Железногорска-Илимского, Тулуна, Черемхово и пос. Онот.

#### ПРИМЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА РЕЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Максимович Н.Г., Березина О.А., Деменев А.Д., Мещерякова О.Ю., Хмурчик В.Т. Естественно-научный институт Пермского государственного национального исследовательского университета, Пермь, nmax54@gmail.com

Аннотация. Для изучения последствий загрязнения поверхностной гидросферы в горнодобывающих регионах, испытывающих значительную техногенную нагрузку, предлагается комплексный подход. Перечислены методы, входящие в комплекс исследований, дано их краткое описание и их возможности. Предлагаемый комплексный подход был успешно применен в исследованиях закономерностей миграции и накопления микрочастиц тяжелых металлов на территории Кизеловского угольного бассейна.

**Ключевые слова:** горнодобывающая промышленность, кислые шахтные воды, речные системы, загрязнение, комплексный подход.

**Abstract.** To study consequences of hydrosphere pollution in mining region exposed to a large technogenic impact the complex approach is proposed. The techniques included in complex approach were listed and briefly described. The proposed approach was successfully applied in the study of trace elements migration and accumulation patterns on the territory of the Kizel coal basin.

**Key words:** mining region, acid mine water, hydrosphere, pollution, complex approach.

В горнодобывающих регионах при разработке рудников как открытым, так и закрытым способом загрязняются атмосфера, гидросфера, почвенный и растительный покров, нарушается рельеф, изменяются условия формирования водного стока и т.д., гипергенные процессы усиливаются и переходят в техногенную стадию, в результате чего формируется горнопромышленный техногенный комплекс с ярко выраженной спецификой негативного воздействия на окружающую среду. При этом наиболее негативное воздействие на окружающую среду оказывают высокоагрессивные техногенные (шахтные и дренажные) воды, загрязняющие приповерхностную гидросферу.

Более 20 лет нами ведутся исследования состояния окружающей среды на территории Кизеловского угледобывающего бассейна, закрытого в настоящее время, но где до сих пор наблюдаются последствия изливов кислых вод (рН 2–4) с высоким содержанием железа, алюминия и микроэлементов, опасным для окружающей среды [1]. Одна из наиболее важных задач – выявление закономерностей миграции элементов в речных долинах, форм их переноса, распределения, осаждения и накопления в системе «вода – донные отложения». Для решения миграционных задач на основании обобщения отечественного, зарубежного, а также собственного опыта разработан комплексный подход к проведению полевых, лабораторных исследований и математического моделирования.

При исследовании поступления кислых шахтных вод в речную сеть обычно проводится общий химический анализ проб воды и донных отложений, а также анализ содержания в них микроэлементов. На основе данных, полученных из разных точек отбора, расположенных с определенной частотой вниз по течению, определяются элементы с реактивным и консервативным поведением и прогнозируется достижение ими ПДК [2, 3], выявляется распределение элементов между водой и донными отложениями [4–6], прогнозируется достижение содержания микроэлементов в донных отложениях фоновых показателей [2, 3, 6, 7].

Методом ступенчатой фильтрации водной взвеси через фильтры с разным размером пор определяются фракции переноса микроэлементов: грубо-, мелкодисперсная, коллоидная и водорастворенная. Аналогичный метод используется и для донных отложений (просеивание отложений в виде водной суспензии) [8]. Для моделирования изменений условий нахождения взвеси в результате изменения уровенного режима реки, ее расхода, а также физико-химических условий, влияющих на фракции взвеси, что может привести к частичному преобразованию грубодисперсной фракции в мелкодисперсную и коллоидную

[3, 9, 10], ставятся дополнительные лабораторные эксперименты по воздействию на взвесь с последующим анализом по указанному методу.

ступенчатой химической экстракции донных Методом отложений [11–16] определяются фазы нахождения в них микроэлементов, при этом особое внимание обращается на химически подвижные фазы, которые при изменении условий окружающей среды могут высвобождать микроэлементы [14]. Методами селективного растворения железистых минералов разной степени кристалличности и аморфных фаз [17, 18] выявляется распределение микроэлементов между ними, что важно для определения дальнейшего при микроэлементов, так как старении осадков происходит взаимопревращение минералов [16, 19-21] с соответствующим изменением подвижности адсорбированных и соосажденных микроэлементов [20].

Минералогические исследования позволяют выявить распределение микроэлементов в различных размерных фракциях донных отложений, рассчитать кислотопродуцирующий и кислотонейтрализующий потенциал и выявить трансформацию отложений в результате техногенного воздействия [22–24].

Активное применение в геохимических исследованиях находят методы математического моделирования [25–30], имеющие свои ограничения [31–34]. В исследованиях сверяются смоделированные программой значения, например коэффициент распределения микроэлементов в системе «вода — осадок» или состав минералов, выпадающих в осадок, с реальными данными, полученными в результате химического и минералогического анализа.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50073 «Микрочастицы тяжелых металлов в гидросфере промышленных районов: идентификация источников, закономерности миграции и накопления, экологический риск».

#### Список литературы

- 1. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2018. 288 с.
- 2. Axtmann E.V., Luoma S.N. Large-scale distribution of metal contamination in the fine-grained sediments of the Clark Fork river, Montana, U.S.A. // Appl. Geochem. 1991. V. 6, iss. 1. P. 75–88.
- 3. Kimball B.A., Callender E., Axtmann E.V. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, USA. //Appl. Geochem, 1995. V 10, iss. 3. P. 285–306.
- 4. Davis A., Olsen R.L., Walker D.R. Distribution of metals between water and entrained sediment in streams impacted by acid mine discharge, Clear Creek, Colorado, U.S.A. // Appl. Geochem. 1991. V. 6, iss. 3. P. 333–348.
- 5. Winland R.L., Traina S.J., Bigham J.M. Chemical composition of ochreous precipitates from Ohio coal mine drainage // J. Environ Qual. 1991. V. 20. P. 452–460.
- 6. Munk L., Faure G., Pride D.E., Bigham J.M. Sorption of trace metals to an aluminum precipitate in a stream receiving acid rock-drainage; Snake River, Summit County, Colorado // Appl. Geochem. 2002. V. 17, iss. 4. P. 421–430.
- 7. Chapman B.M. Numerical simulation of the transport and speciation of nonconservative chemical reactants in rivers // Water Resour Res. 1982. V. 18, iss. 1. P. 155–167.
  - 8. Stumm W., Morgan J.J. Aquatic Chemistry. John Wiley and Sons, 1996. 3rd ed.
- 9. Butler B.A., Ranville J.F., Ross P.E. Observed and modeled seasonal trends in dissolved and particulate Cu, Fe, Mn, and Zn in a mining-impacted stream // Water Res. 2008. V. 42, iss. 12. P. 3135–3145.
- 10. Paulson J.A., Balistrieri L. Modeling removal of Cd, Cu, Pb, and Zn in acidic groundwater during neutralization by ambient surface waters and groundwaters // Environ Sci Technol. 1999. V. 33, iss. 21. P. 3850–3856.
- 11. Dold B. Speciation of the most soluble phases in a sequential extraction procedure adapted for geochemical studies of copper sulfide mine waste // J. Geochem. Explorat. 2003. V. 80, iss. 1. P. 55–68.
- 12. Håkansson K., Karllson S., Allard B. Effects of pH on the accumulation and redistribution of metals in a polluted stream bed sediment // Sci Total Environ. 1989. V. 87/88. P. 43–57.
- 13. Karlsson S., Allard B., Håkansson K. Characterization of suspended solids in a stream receiving acid mine effluents, Bersbo, Sweden // Appl. Geochem. 1988. V. 3, iss. 3. P. 345–356.
- 14. Ranville M., Rough D., Flegal A.R. Metal attenuation at the abandoned Spenceville copper mine // Appl. Geochem. 2004. V. 19, iss. 5. P. 803–815.
- 15. Tessier A., Campbell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals # Anal. Chem. 1979. V. 51. P. 844–851.

- 16. Zhao H., Xia B., Qin J., Zhang J. Hydrogeochemical and mineralogical characteristics related to heavy metal attenuation in a stream polluted by acid mine drainage: A case study in Dabaoshan Mine, China // J. Environ. Sci., 2012. V. 24, iss. 6. P. 979–989.
- 17. Rose S., Elliot W.C. The effects of pH regulation upon the release of sulfate from ferric precipitates formed in acid mine drainage // Appl. Geochem. 2000. V. 15, iss. 1. P. 27–34.
- 18. Singh B., Wilson M.J., McHardy W.J., Fraser A.R., Merrington G. Mineralogy and chemistry of ochre sediments from an acid mine drainage near a disused mine in Cornwall, UK // Clay Minerals. 1999. V. 34. P. 301–317.
- 19. Hammarstrom J.M., Seal R.R., Meier A.L., Kornfeld J.M. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments // Chem. Geol. 2005. V. 215, iss. 1-4. P. 407–431.
- 20. Kupka D., Pállová Z., Horňáková A., Achimovičová M., Kavečanský V. Effluent water quality and the ochre deposit characteristics of the abandoned Smolník mine, East Slovakia // Acta Montanistica Slovaca. 2012. V. 17, iss. 1. P. 56–64.
- 21. Murad E., Rojik P. Iron mineralogy of mine-drainage precipitates as environmental indicators: review of current concepts and a case study from the Sokolov Basin, Czech Republic // Clay Miner. 2005. V. 40, iss. 4. P. 427–440.
- 22. Parbhakar-Fox A.K., Edraki M., Walters S., Bradshaw D. Development of a textural index for the prediction of acid rock drainage // Miner. Engineer. 2011. V. 24. P. 1277–1287.
- 23. Skousen J.G., Simmons J., McDonald L M., Ziemkiewicz P. Acid-base accounting to predict post-mining drainage quality on surface mines // J. Environ. Qual. 2002. V. 31. P. 2034–2044.
- 24. Weber P.A., Thomas J.E., Skinner W.M., Smart R.St.C. A methodology to determine the acid-neutralization capacity of rock samples // Can. Mineral. 2005. V. 43. P. 1183–1192.
- 25. Ball J.W., Nordström D.K. WATEQ4F–User's manual with revised thermodynamic data base and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters. Open-File Report 90-129. U.S. Geological Survey, 1991. 185 p.
- 26. Mangold D.C., Tsang C.F. A summary of subsurface hydrological and hydrochemical models # Rev. Geophys. 1991. V. 29. P. 51–79.
- 27. Alpers C.N., Nordström D.K. Geochemical modeling of water-rock interactions in mining environments. In: The environmental geochemistry of mineral deposits, part A: processes, methods, and health issues (Plumlee G.S., Logsdon M.J., Eds.) // Rev. Econ. Geol. 1999. V. 6A. P. 289–323.
- 28. Nordström D.K. Modeling low-temperature geochemical processes // Treatise on geochemistry (Holland H.D., Turekian K.K., Eds.), 2003. V. 5. P. 37–72.
- 29. Runkel R.L. One-dimensional transport with equilibrium chemistry (OTEQ): a reactive transport model for streams and rivers // USGS Techniques and Methods Book. 2010. V. 6, ch. B6.
- 30. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3 A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimentional transport, and inverse geochemical calculations // U.S. Geological Survey Water-resources investigations, Sect. A, Chapt. 43, Groundwater Book 6, Modeling techniques: Techniques and methods 6-A43 U.S. Geological Survey, 2013.
- 31. Keely J.F. Modeling subsurface contaminant transport and fate // Transport and fate of contaminants in the subsurface. EPA/625/4-89/019. U.S. Environmental Protection Agency, 1989. P. 101–131.
- 32. Nordström D.K., Ball J.W. Mineral saturation states in natural waters and their sensitivity to thermodynamic and analytical errors // Sci. Geol. Bull. 1989. V. 42. P. 269–280.
- 33. Iordache V., Ion S., Pohoață A. Integrated modeling of metals biogeochemistry: Potential and limits // Chemie der Erde. 2009. V. 69, No. S2. P. 125–169.
- 34. Runkel R.L., Kimball B.A., Walton-Day K., Verplanck P.L., Broshears R.E. Evaluating remedial alternatives for an acid mine drainage stream: A model post audit // Environ. Sci. Technol. 2012. V. 46, iss. 1. P. 340–347.

# ПРОБЛЕМЫ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СЛАБОПРОНИЦАЕМЫХ ПОРОДАХ (НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА РАЗМЕЩЕНИЯ ПОДЗЕМНОЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ В КРАСНОЯРСКОМ КРАЕ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-516-520

Неуважаев Г.Д., Озерский Д.А., Расторгуев А.В., Пленкин А.В., Григорьев Ф.В. *Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, oda@ibrae.ac.ru* 

**Аннотация**. В настоящей статье рассмотрен опыт моделирования фильтрационного и миграционного режима в геологическом массиве, отведенном под строительство подземной исследовательской лаборатории в Красноярском крае. Назначение граничных условий зоны моделирования и параметрических характеристик геологических элементов в массиве произведено по данным полевых работ поисково-оценочной стадии, проведенных на ограниченной площади. Положение и параметры разрывных нарушений и водопроводящих трещин требуют дополнительного изучения, в т.ч. на территории дальней зоны подземной исследовательской лаборатории.

**Ключевые слова:** дальняя зона, фильтрация, целевой горизонт, граничные условия, подземные исследовательские лаборатории (ПИЛ).

**Abstract.** In this article the modeling of flow and transport in rock mass selected for construction of an underground research laboratory in Krasnoyarski Krai has been described. Assignment of boundary conditions of the modeling zone and parametric characteristics of geological elements in the rock mass has been set according to the data collected at the prospecting and evaluation stage while fieldwork within the area of interest. Location of water-conducting fracture zones characteristics would be subject to further investigation and research, including the area of an underground research laboratory far zone.

Key words: far field, seepage, target depth, boundary condition, underground research laboratories (URL).

Глубокое геологическое захоронение признано во всем мире как возможный и безопасный способ захоронения РАО, а подземные исследовательские лаборатории (ПИЛ) играют важную и многогранную роль в разработке пунктов захоронений данного класса. Документ МАГАТЭ «Научное и техническое обоснование геологического захоронения радиоактивных отходов» [1] предписывает при рассмотрении ключевых вопросов безопасности изучить все условия природной среды, связанные с захоронением долгоживущих радиоактивных отходов, а именно детализировать характеристики геохимических элементов и барьеров ближней и дальней зоны для оценки безопасности и эффективности.

Согласно Глоссарию МАГАТЭ [2], дальняя зона определяется как «геосфера за пределами объекта захоронения, ограниченная геологическими слоями, в пределах которых моделирование процессов, протекающих на объекте захоронения, не требует учета влияния отдельных капсул, а рассматривает объект захоронения как единое целое». Для практических целей зачастую используется определение дальней зоны как «геосфера за пределами ближней зоны».

Выбор участка размещения лаборатории при таком подходе играет потенциально важную роль, так как описательная и расчетная характеристика зон участка и данные, полученные в ходе экспериментов ПИЛ, являются основанием для решения о возможности использования площадки под строительство объекта захоронения. Работа подземной исследовательской лаборатории, создаваемой для конкретного хранилища, направлена на изучение пригодности вмещающих пород, проведение общих исследований и разработок (НИОКР), разработку рекомендаций для планирования подземных выработок и проектирование хранилища в целом, а также демонстрацию технологических решений и методик.

При проведении практических полевых исследований не всегда возможно достоверно описать все пути фильтрации, но стохастические свойства поля фильтрации могут быть использованы для построения моделей, в которых прогнозируемые характеристики (проницаемость, скорость потока и время утечки радионуклидов) можно рассчитать.

Опыт прогнозирования фильтрации известных зарубежных ПИЛ и объектов захоронения РАО был связан с созданием численных моделей геофильтрации в пределах зоны их возможного влияния (дальней зоны). Постановка моделей основывалась на комплексном анализе и применении всех имеющихся данных по геологии, гидрогеологии, геомеханике, топографии и т.д. в границах дальней зоны исследований. Результаты прогнозных оценок позволили сделать вывод о возможности дальнейшего использования участков в целях захоронения РАО: на участке исследований французского агентства по ядерным отходам (ANDRA – Agence national pour la gestion des déchets radioactifs), расположенного около деревни Бюр в Восточной Франции, предположение, что в течение следующих 500 000 – 1 миллиона лет не прогнозируется существенных изменений в гидрогеологических условиях участка площадью около 200 км<sup>2</sup>, принятого в качестве границ дальней зоны объекта [3]; на объекте ONKALO, финской Posiva, отвечающей за утилизацию отработавшего ядерного топлива, компании прогнозируется, что в долгосрочной перспективе разгрузка потенциально загрязненных вод будет происходить в пределах обозначенной дальней зоны площадью не более 26 км<sup>2</sup> [4].

Проведение расчетного обоснования для дальней зоны ПИЛ на участке Енисейском также сопровождается созданием численных прогнозных моделей фильтрации подземных вод. Составители данных моделей являются пользователями всей имеющейся информации по геологии, гидрогеологии, физико-механическим свойствам и природно-климатическим условиям района исследований. При этом необходимо отметить, что построения выполнены на имеющейся базе данных, полученной за время поисков и оценки участка недр, пригодного для размещения объекта подземного захоронения РАО, т.е. за последние 20–25 лет.

Геологическая основа моделирования гидродинамической ситуации в дальней зоне участка Енисейского на сегодняшний день проработана наиболее глубоко на площадке поисково-оценочных исследований площадью 6 км². Специфика территориального и ландшафтного расположения участка строительства ПИЛ обуславливает расположение границ расчетной области в плане, что облегчит задачи изучения неопределенностей в условиях распределения поверхностного стока, наличия разрывных нарушений, поисков реальных контуров непроницаемости или естественных барьеров, исключающих фильтрацию вод с потенциалом загрязнения. Площадь предполагаемой дальней зоны ПИЛ на участке Енисейском – 176.62 км² (рис. 1).

При разработке модели учитывались региональные исследования, что позволило подойти к назначению границ дальней зоны по геологическим принципам. Подошва модели была принята на глубинах ниже развития пород региональной трещиноватости (выветрелой зоны) архейских отложений. Для задания структурных геологических элементов в модели данные импортировались из программы геологического моделирования Місготіпе. При этом в пределах изученной площади оцифрованы положения и характеристики разрывных нарушений, даек, зон милонитизации, в то время как на площади дальней зоны эти элементы не экстраполированы и она представлена сплошной фильтрационной средой.

На основе данных геологического анализа космического фотографирования, данных по тектонике и сейсмическому мониторингу на площади дальней зоны будут выделены монолитные тектонические блоки. На сегодняшний день эта работа проводится, но при моделировании фильтрации пока не применяется задание блоковой структуры по всему массиву.

Фильтрационные свойства пород массива задавались на основе результатов опытнофильтрационных работ, составляющих гидрогеологическую базу данных участка Енисейского. Она включает экспериментальные данные по поинтервальным пакерным ОФР с шагом 50 м в глубоких скважинах, кустовые откачки из групп скважин и режимные наблюдения. Основу составляют данные первичной интерпретации результатов [5]. В целом, характеристики проницаемости и обводненности пород в условиях развития архейских пород требуют конкретизации местоположения проводящих трещин и зон для уточнения блоковой модели. На текущем уровне детализации данных о площадке наиболее оптимальными методами расчета течения в трещиновато-пористой среде представляются два подхода: 1) модель сплошной среды и 2) модель сети дискретных трещин и матрицы (англ. Discrete Fracture Matrix – DFM).

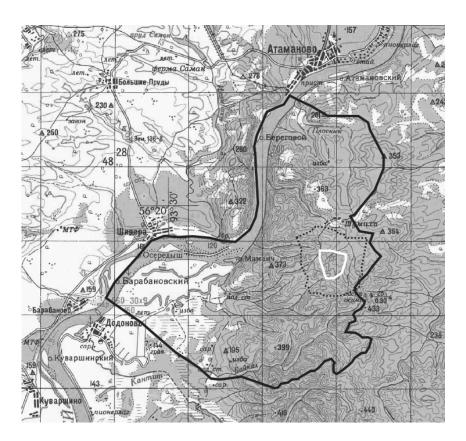


Рис. 1. Границы геофильтрационной модели. Белая линия — граница лицензионной площади Енисейского участка; пунктирная линия — санитарно-защитная зона площадки строительства ПИЛ; черная линия — граница фильтрационной модели.

Первый подход идентичен классическому осреднению в пористой среде с использованием концепции элементарного репрезентативного объема с приведением эффективной проницаемости к расчетному объему, что недостаточно корректно отражает результаты расчетов в монолитных блоках. Модели сети дискретных трещин и матрицы являются попыткой соблюсти баланс между потерей точности при осреднении в моделях сплошной среды и геометрической сложностью моделей дискретных трещин. В таких моделях предполагается, что жидкость находится и в явно представленных трещинах, и в содержащей трещины пористой матрице. Это позволяет часть трещин, размером много меньше размера интересующей области, отнести к пористой матрице, а не учитывать явно. Критерием отнесения трещин к явной сети или к пористой матрице чаще всего служит размер трещины.

В данной работе для расчетов применялись оба подхода на основе единой трехмерной модели. При этом в модели на основе подхода сплошной среды фильтрация рассчитывалась как в напорной, так и в напорно-безнапорной постановке, а основные структурные элементы (дайки и разломы) задавались в виде вертикальных структур и разрешались на сетке трехмерными ячейками. В свою очередь, в рамках DFM-подхода разрывные нарушения третьего порядка (Верхнешумихинский, Верхнемеркурьевский, Меркурьевский) были учтены в соответствии с их реальными простираниями и падениями, уточненными по

результатам бурения, с помощью поверхностей, проходящих через оси данных структурных элементов. Фильтрационная задача решена только в напорной постановке.

Трехмерная модель в рамках подхода сплошной среды была разработана с помощью аттестованного кода GeRa/V1 [6], который с помощью неортогональной дискретизации позволил отразить геологические особенности объекта. По вертикали модель разбита на 16 слоев и содержит 340 тыс. ячеек. Первый модельный слой соответствует неогенчетвертичным отложениям. Остальные слои имеют равную мощность в 50 м, такая мощность была выбрана для того, чтобы соответствовать результатам пакерных исследований, проведенных в 2012–2014 гг.

Расчетная область в плане сформирована естественными границами: р. Енисей на западе формирует граничное условие первого рода, являясь региональной дреной; восточная, северная и южная границы установлены по признаку непроницаемости второго рода и происходят по линии водосборов поверхностных водотоков второго и третьего порядка.

В расчетной области учтены основные водотоки, протекающие по участку Енисейский, а именно р. Енисей, Шумиха, Студеный, Безымянный, Байкал, Плоский. Инфильтрационное питание задавалось как  $2.5E^{-4}$  м/сут. В ходе калибровки модели уточнены коэффициенты фильтрации разрывных нарушений и матрицы (таблице).

Принятые коэффициенты фильтрации

Материал	Коэффициент фильтрации,	Инфильтрационное					
	м/сут	питание, м/сут					
Неоген-четвертичные отложения	0.5	0.00025					
Матрица	0.0001	_					
Дайки	0.005	_					
Разрывные нарушения	0.1	_					

Модель в рамках DFM подхода также строилась в расчетном коде GeRa на основе описанной выше трехмерной модели. Толщина разрывных нарушений предполагалась постоянной, поэтому была выбрана средняя величина: 15 м для Верхнешумихинского, 5 м для Меркурьевского и Верхнемеркурьевского. Сеточная модель построена на основе треугольно-призматической сетки (модель сплошной среды) разбиением поверхностями разрывных нарушений, заданными триангуляцией. Грани разрезов являются ячейками двумерной сетки на разрывном нарушении. Таким образом, сетка на поверхности разрывного нарушения получается конформной трехмерной сетке в пористой матрице, что облегчает расчет водообмена между ними. Дискретизация потоков в задаче осуществляется с использованием двухточечной схемы метода конечных объемов. Помимо разломов на модели были заданы дайки вертикально ориентированными поверхностями. В результате расчетная область содержит 1 244 870 ячеек сетки, что почти в четыре раза больше, чем в модели сплошной среды.

По результатам моделирования основные векторы скоростей направлены в северном и западном направлении (рис. 2). Сплошная среда в дальней зоне в данной постановке не оказывает влияния на развитие фильтрационных полей. Задание блоковой структуры с развитием трехмерных геологических построений всего массива видится важнейшим направлением развития фильтрационной модели дальней зоны участка Енисейского.

Важным становится тот факт, что наибольшие скорости наблюдаются в модели DFM, а преимущественное движение — на контакте разрывного нарушения и матрицы. Модельные расчеты показывают, что основная миграция может проходить по зонам разрывных нарушений либо на контакте с матрицей. В целом, модель адекватна к представлению геофильтрационных процессов в блоковой структуре и ее развитие видится в детализации всех разрывных нарушений в дальней зоне участка проектируемого ПИЛ с учетом их мощностных и угловых характеристик.

Таким образом, полученные результаты гидрогеологического моделирования соответствуют данным оценочной стадии изучения недр. Для дальнейшего развития модели необходимо провести дополнительные детальные исследования, которые бы позволили снизить существующие неопределенности и подтвердить или опровергнуть существующие представления, чего и требует мировая практика.

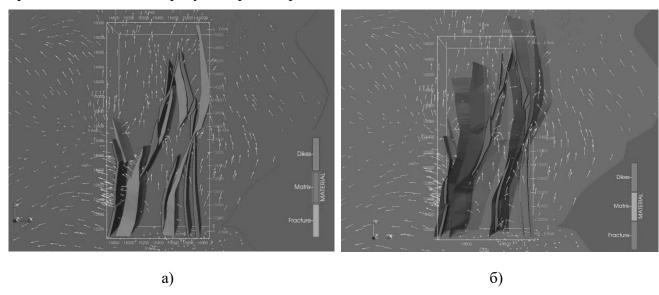


Рис. 2. Направление векторов скоростей для целевого горизонта для моделей: a) — сплошной среды,  $\delta$ ) — дискретной среды.

#### Список литературы

- 1. Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 413, IAEA, Vienna, 2003.
  - 2. IAEA Safety Glossary. Terminology used in nuclear safety and radiation protection. IAEA, 2018.
- 3. Andra research on the geological disposal of high-level long-lived radioactive waste. Results and perspectives, Dossier, 2005.
  - 4. Site Scale Groundwater Flow in Olkiluoto. Jari Lofman, VTT Energy, Posiva, 1999.
- 5. Караулов В.А., Заблоцкий К.А. и др. Геологическое доизучение (оценочная стадия) горного массива участка «Енисейский» для обоснования расширения интервала захоронения радиоактивных отходов до глубин 450–525 метров (+5...-70 м БС) объектов окончательной изоляции радиоактивных отходов (Красноярский край, Нижне-Канский массив). Красноярск: ОАО «Красноярскгеология», 2015.
- 6. Капырин И.В. и др. Интегральный код GeRa для обоснования безопасности захоронения радиоактивных отходов // Горный журнал. 2015. № 10. С. 44–50.

### ФТОР В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ ЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ВОСТОКА ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО БАССЕЙНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-521-526

Озёрский А. Ю. $^{1}$ , Иванова Т. П. $^{2}$ 

<sup>1</sup> AO «Красноярская горно-геологическая компания», Красноярск, ozerski@krasgeo.ru <sup>2</sup> Департамент по недропользованию по Центрально-Сибирскому округу, Красноярск, vv@centrsibnedra.ru

**Аннотация.** Рассматривается распространение фтора в подземных водах юрских водоносных комплексов на юго-востоке Западно-Сибирского бассейна. Повышенные концентрации фтора, обусловливающие загрязнение подземных вод, приурочены к наиболее глубоким горизонтам, залегающим на докембрийском фундаменте.

Ключевые слова: фтор, юрский комплекс, Западно-Сибирский бассейн, гидрохимия.

**Abstract.** The distribution of fluorine in groundwater of Jurassic aquifers in the southeast of the West Siberian basin is shown. Significant fluorine concentrations, that cause groundwater pollution, are associated to the deepest horizons overlying the Precambrian basement.

Key words: fluorine, jurassic aquifer, West Siberian basin, hydrochemistry.

#### Введение

В 2019 г. городу Енисейску, «отцу-основателю» многих городов Восточной Сибири, исполнилось 400 лет. К этому юбилею правительство Красноярского края решило построить для жителей города новый водозабор на базе разведанного в 2001 г. Горского месторождения питьевых подземных вод. От месторождения до города был проложен трехкилометровый водопровод, были построены насосные станции. Однако, при проверке старых разведочных скважин и опробовании новых в 2013–2015 гг., оказалось, что концентрация фторидов в воде существенно превысила питьевую ПДК (1.5 мг/дм³), составив 2.0–2.5 мг/дм³. Это обстоятельство потребовало включения в проект водозабора станции дефторирования, что привело к пересмотру и значительному удорожанию проектных решений.

Возникшая острая и неприятная для нас, гидрогеологов, ситуация привлекла внимание к проблеме фторидов в считавшихся практически «чистыми» среднеюрских глубоких горизонтах. Ранее, к концу XX столетия, в результате изучения юрской континентальной угленосной формации сформировалось представление о юго-восточной окраине Западно-Сибирского бассейна как о минерагенической провинции пресных и экологически чистых подземных вод [4]. Исходя из условий формирования юрских отложений предполагалось, что качество подземных вод в глубоких горизонтах юрских песчаников априорно должно соответствовать нормативам вод хозяйственного-питьевого назначения, а фтор ранее не рассматривался в качестве возможного загрязняющего компонента.

Присутствие фторидов в высоких концентрациях в подземных водах строящегося водозабора и разведанных месторождений с утвержденными запасами требует от нас ответов на вопросы о причинах этого явления, источнике фтор-иона и о перспективах этой гидрогеологической структуры для дальнейших поисково-разведочных работ на воду питьевого качества.

Ответ на первый из вопросов достаточно прост. До 2007 г., когда была утверждена действующая Классификация запасов подземных вод [6], решение по оценке соответствия нормативам хозяйственно-питьевым качества подземных вод ДЛЯ разведанных месторождений принималось Территориальной комиссией по запасам полезных ископаемых (ТКЗ). До 2007 г. ТКЗ нередко утверждала запасы подземных вод даже в том случае, если в ряде анализов концентрации некоторых нормируемых компонентов превышали предельно Таким образом, результате работ, проведенных В «Красноярскгидрогеология», в 1996 г. были утверждены запасы Колесниковского месторождения для водоснабжения г. Лесосибирска. В 2001 г. то же предприятие

представило в ТКЗ запасы Горского месторождения для водоснабжения г. Енисейска. В обоих этих месторождениях концентрации фторидов в значительной части проб превысили ПДК (табл. 1).

В 2005–2006 гг. при оценке запасов Сухобузимского месторождения для резервного водоснабжения Красноярска, выполненной АО «Красноярскгеология», гидрогеологом Н.Н. Петровой впервые была определена пространственная локализация повышенных концентраций фтора, а запасы подземных вод этого месторождения были подсчитаны для горизонта, имеющего допустимые концентрации фторидов.

Таблица 1. Месторождения питьевых подземных вод в глубоких нижне- и среднеюрских

горизонтах и концентрации фторидов в них

	Месторождения и	Год	Запасы	Глубина горизонта	Концентрации фтора, мг/дм <sup>3</sup>		Встречаемость фтора, %	
№	участок	оценки	тыс. м <sup>3</sup> /сут	, M	От – до	Среднее	Всег	>ПДК
1	Колесниковское	1996	10.00	220-480	0.1–2	1.27	100	45
2	Горское	2001	15.00	320–390	0-2.62	1.61	94	67
3	Белоярское	2003	4.3	400–550	0-0.25	0.17	80	0
4	Сухобузимское	2006	30.0	500-600	0-4.16	1.42	100	32
5	Черемшанское	2009	16.0	235-400	< 0.1	< 0.1	0	0
6	Секретарское	2011	4.8	480–700	0.12-0.2	0.18	100	0
7	Гляденский уч-к	2012	0.5	640–670	0-0.44	0.06	13	0

Что касается ответов на вопросы об источнике фтор-иона и о перспективах этой гидрогеологической структуры, то они требуют анализа ее гидрогеологических условий, чему, собственно, посвящена эта статья.

#### Материалы и методика исследований

Хотя фтор относится к распространенным элементам, он, вместе с тем, характеризуется слабой изученностью. Кларк литосферы фтора равен 640 г/т [1], а его среднее содержание в пресных подземных водах зоны гипергенеза равно  $0.26 \text{ мг/дм}^3$  [7]. В маломинерализованных фтороносных водах содержания фтора обычно составляют первые единицы мг/дм³, достигая  $30 \text{ мг/дм}^3$  [2].

Однако анализы пород и подземных вод на фтор в практике геологических и гидрогеологических исследований выполняются довольно редко. Фтор в подземных водах, как правило, изучается только при подсчете их запасов как необходимое условие оценки их качества. Почти все анализы воды на фтор в изучаемом регионе были получены при оценке запасов подземных вод, участие в которой в разные годы приняли авторы, а также их коллеги из ГГП «Красноярскгидрогеология». Всего в геологических фондах и архивах авторов для изучаемого региона было найдено 78 анализов воды на фтор, но только 51 анализ фторидов сопровождался полным химическим анализом воды на главные ионы.

Этот 51 анализ использовался для выявления корреляционных связей фтора с другими гидрогеологическими компонентами на основе факторного анализа. Последний выполнялся методом главных компонент с варимаксным вращением корреляционной матрицы на программном комплексе компании StatSoft «STATISTICA 12».

Как известно, накопление фтора в подземных водах лимитируется присутствием ионов кальция, так как фторид кальция труднорастворим. Растворимость  $CaF_2$  при 5–10 °C равна 0.014 г/л, произведение растворимости  $\Pi P_{CaF_2} = 2.3 \cdot 10^{-11}$  [2]. Оценка способности подземных вод к осаждению фторида кальция проводилась с учетом их ионной силы и коэффициентов активности ионов, которые были вычислены для всех ионов по известному уравнению Дебая-Хюккеля. Активные концентрации ионов определялись умножением молярных концентраций ионов на их коэффициенты активности. Произведения активностей

ионов фтора и кальция  $L_{\mathcal{C}a\mathcal{F}_2}$  в пробах были вычислены как произведение активных концентраций ионов  $L_{\mathcal{C}a\mathcal{F}_2} = [\mathrm{Ca}^{2+}] \cdot [\mathrm{F}^-]^2$ . Если  $L_{\mathcal{C}a\mathcal{F}_2} < \Pi \mathrm{P}_{\mathcal{C}a\mathcal{F}_2}$ , то осаждение фторида кальция невозможно и фтор присутствует в воде в виде иона.

Фтор в водоносных породах практически не изучен, так как в практике отечественных гидрогеологических работ изучать геохимию водоносных пород не принято. В 2001 г. ведущий геолог ФГУГП «Красноярскгеолсъемка» А.Н. Минаков при проведении эколого-геохимических исследований в южной части Красноярского края по 14 пробам из юрских отложений вычислил в них фоновую концентрацию фтора, равную 330 г/т, при разбросе значений от 150 до  $560 \, \text{г/т}$ .

#### Результаты исследований и их обсуждение

Юго-восточная окраина Западно-Сибирской плиты, известная также как Чулымо-Енисейский бассейн, характеризуется преимущественным распространением поровопластовых вод в терригенных континентальных юрских отложениях (рис. 1). Основные ресурсы подземных вод бассейна связаны с мощной толщей средне- и нижнеюрских слаболитифицированных терригенных угленосных отложений, вскрытых скважинами до глубины 800 м. Юрские отложения подстилаются кристаллическими докембрийскими породами в непосредственной близости от долины Енисея, а к западу от нее — осадочными слабодислоцированными палеозойскими образованиями.



Рис. 1. Схема месторождений подземных вод в пределах юго-восточной окраины Западно-Сибирского бассейна.

В нижнесреднеюрской толще выделено до пяти водоносных горизонтов слабых песчаников, разделенных слоями слабопроницаемых алевропелитов и бурых углей. Наиболее мощными и водоносными являются два базальных слоя песчаников, нижний из которых (нижнеюрский) залегает на породах фундамента, а верхний приурочен к основанию средней юры. Нижний горизонт песчаников вскрывается на глубинах от 200 до 690 м, мощность песчаников изменяется от первых десятков до 230 м. Среднее значение водопроводимости составляет 40 м²/сут, пьезопроводности — 2·10<sup>5</sup> м²/сут. Сверху нижнеюрский горизонт перекрыт стометровой толщей практически непроницаемых аргиллитов, над которой находится среднеюрский горизонт. Последний вскрыт на глубинах от 150 до 500 м, его средняя мощность равна 86 м. Водопроводимость пород в среднем равна 30 м²/сут, а пьезопроводность — 2.4·10<sup>5</sup> м²/сут. Воды обоих горизонтов имеют высокий напор, многие скважины фонтанируют. В большинстве случаев разведанные запасы подземных вод связаны со среднеюрским горизонтом.

На всю мощность юрского осадочного чехла (до 800 м) подземные воды являются пресными, щелочными, гидрокарбонатными натриевыми (табл. 2). Такой химический состав, который О.Е. Лепокурова [3] справедливо назвала уникальным, формируется в результате гидролиза хорошо промытых кварцево-полевошпатовых песчаников, а также ионного обмена, выводящего из раствора ионы калия и кальция. Характерно, что с глубиной не происходит нарастания концентраций хлоридов и сульфатов, а в условиях недостатка углекислоты накапливается гидроксидный ион ОН<sup>-</sup>, образующийся при гидролизе [3].

Таблица 2. Средние показатели макрохимического состава подземных вод месторождений в

глубоких юрских горизонтах

Titly certaint repetition 1	_1	ı						
		Месторождения						
Показатели	Ед. изм.	Колесни-	Горское	Сухобузим-	Среднее по 7			
		ковское	Торскос	ское	месторожд.			
рН	ед. рН	8.65	7.99	8.60	8.4			
C1-	$M\Gamma/дM^3$	9.8	22.6	9.3	14.1			
$SO_4^{2-}$	$M\Gamma/дM^3$	1.8	25.2	11.5	14.2			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	400.5	389.3	600.4	483			
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	162.4	128.3	238.6	183			
$\frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+}}$	мг/дм <sup>3</sup>	0.9	9.0	5.2	5.6			
Ca <sup>2+</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	11.9	26.1	6.6	14.6			
Fe общее	мг/дм <sup>3</sup>	0.4	0.3	0.2	0.26			
Минерализация	мг/дм <sup>3</sup>	588	622	899	734			
Ионная сила	моль/дм <sup>3</sup>	0.015	0.018	0.017	0.017			
$L_{CaF_{p}}$	_	$3.1 \cdot 10^{-12}$	$4.8 \cdot 10^{-12}$	$1.56 \cdot 10^{-12}$	$3.04 \cdot 10^{-12}$			

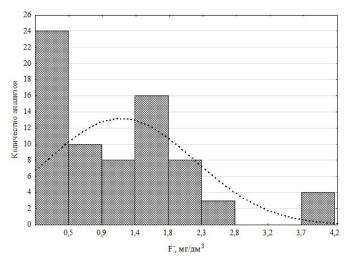


Рис. 2. Гистограмма распределения F<sup>-</sup>.

Фториды обнаружены в водах обоих горизонтов, но повышенные концентрации, превышающие ПДК, встречаются не повсеместно. Наиболее высокие концентрации фтора приурочены к нижнему горизонту, залегающему на породах докембрийского фундамента. Максимальное содержание фтора (8 мг/дм³) было выявлено в 800-метровой скважине в п. Березовка (восточнее Красноярска). Повышенные концентрации фтора (4.0–4.2 мг/дм³) также обнаружены в водах Сухобузимского месторождения, в нижнем горизонте, залегающем на кристаллическом докембрии. Также повышены концентрации фторидов в водах среднеюрского горизонта Горского месторождения (2.0–2.6 мг/дм³), причем наблюдается рост концентраций со временем. Повышенные концентрации фтора и превышения над ПДК наблюдаются только в тех месторождениях, где юрские горизонты

залегают на кристаллических докембрийских образованиях вблизи долины Енисея. Там, где юрские горизонты подстилаются осадочным палеозоем, концентрации фторидов никогда не превышают  $0.25~{\rm Mf/дm}^3$ .

Даже при самых высоких содержаниях фторидов произведение активных концентраций ионов фтора и кальция  $L_{\it CaF_2}$  ни в одной пробе не превышает произведения растворимости  $\Pi P_{\it CaF_2} = 2.3 \cdot 10^{-11}$  (табл. 2), что обусловлено низкими концентрациями обоих ионов. Таким образом, геохимические условия для осаждения фторида кальция отсутствуют, и именно это обстоятельство формирует условия для загрязнения подземных вод фтором. Вместе с тем в тех водах, где концентрации кальция достигают 80–90 мг/дм $^3$ , содержание фторидов не превышает 0.10–0.13 мг/дм $^3$ .

Гистограмма распределения фторидов показывает их гетерогенную природу, в которой проявляется не менее двух источников происхождения фтора (рис. 2). Левая часть гистограммы характеризует поступление автохтонного фтора из юрских водоносных пород, характеризующихся весьма невысоким содержанием этого элемента. Правая часть гистограммы отражает поступление фтора из аллохтонного источника, не связанного с водоносными породами, а ее средняя часть – смешение вод из обоих источников.

В факторном анализе фтор не проявил корреляции ни с компонентами общего химического состава глубоких горизонтов (І фактор), ни с компонентами приповерхностных условий (ІІ фактор) (табл. 3). Спутником фтора является хлор-ион, являющийся типичным компонентом глубинного генезиса (ІІІ фактор).

Таблица 3. Результаты факторного анализа химического состава подземных вод

	Факторы						
Компоненты	I	II	III				
Cl-	0.00	-0.02	0.88				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.11	-0.51	0.35				
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.96	0.06	-0.07				
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	0.79	0.56	0.16				
Mg <sup>2+</sup> Ca <sup>2+</sup>	0.00	-0.87	-0.13				
Ca <sup>2+</sup>	-0.15	-0.90	-0.16				
pН	0.33	0.75	-0.13				
F <sup>-</sup>	0.12	0.28	0.81				
Минер.	0.96	0.07	0.10				
Доля дисперсии	0.28	0.26	0.15				

Примечание. Жирным шрифтом выделены значимые факторные нагрузки.

Выявленные особенности пространственного и статистического распределения фторидов дают нам основание предполагать, что основным источником их повышенных концентраций является восходящая миграция фтороносных флюидов из пород кристаллического фундамента по зоне Приенисейского глубинного разлома, проходящего под долиной Енисея. В архейских породах Южно-Енисейского кряжа, примыкающего к изучаемому бассейну с востока, среднее содержание фтора превышает кларк, составляя 750—850 г/т [5]. Вследствие малой водоносности кристаллических пород загрязнение вод фтором не достигает высоких значений.

#### Заключение

Присутствие фтора в подземных водах юрского водоносного комплекса в повышенных концентрациях, превышающих питьевую ПДК, осложняет возможности освоения ряда разведанных месторождений. Повышенные концентрации фтора приурочены к долине Енисея, где под юрским комплексом залегают кристаллические породы

фундамента. Генезис повышенных концентраций фтора может объясняться притоком хлоридных фтороносных флюидов из кристаллического фундамента.

При проведении поисково-разведочных работ на подземные воды в придолинной зоне Енисея наименее перспективным предлагается считать нижнеюрский горизонт из-за более высокой вероятности его загрязнения фторидами. В состав гидрогеологических работ рекомендуется включать опробование водоносных и водоупорных пород на валовые и водорастворимые формы фтора.

#### Список литературы

- 1. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Справочник. Кн. 2. М.: Недра, 1994. 303 с.
- 2. Крайнов С.Р. Шваров и др. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии. М.: Недра, 1988. 254 с.
- 3. Лепокурова О.Е. Геохимия уникальных пресных щелочных вод Чулымского бассейна // Вестник Томского государственного университета. 2012. № 365. С. 181–186.
- 4. Озерский А.Ю. Чулымо-Енисейская провинция пресных экологически чистых подземных вод // Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: Материалы научной конференции 20–24 сентября 2005 г. Иркутск: ИГ СО РАН, 2005. С. 376–378.
- 5. Озерский А.Ю. Геохимические особенности нижнеархейских пород на участке вероятного подземного строительства в южной части Енисейского кряжа // Разведка и охрана недр. 2012. № 7. С. 39–44.
- 6. Классификация запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод. Утверждена приказом МПР России от 30 июля 2007 года № 195. [Электронный ресурс]. ФБУ «ГКЗ». URL: http://gkz-rf.ru/podzemnye-vody#page-accord-172 (дата обращения: 15.01.2021).
  - 7. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1998. 366 с.

### ПРАВОВЫЕ ПРОБЕЛЫ В ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВЕ О НЕДРАХ ПРИ ГЛУБИННОЙ ЗАКАЧКЕ БУРОВЫХ ОТХОДОВ И СТОКОВ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-527-531

#### Павленко О.Л., Боровская Т.А.

Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Pavlenko Olga@tmnsc.ru, TABorovskaya@tmnsc.ru

**Аннотация.** В статье отражены основные правовые проблемы, с которыми сталкивается недропользователь при получении разрешительной документации глубинного размещения избытка попутных вод, буровых и иных отходов. Отражена последовательность выполнения проектных и отчетных работ и проблемы, возникающие на каждом этапе. Обозначены возможные варианты устранения законодательных пробелов.

Ключевые слова: глубинная закачка, попутные воды, буровые отходы, нормативные документы.

**Abstract.** The article presents the main legal problems faced by a subsoil user when obtaining permits for the deep placement of excess associated water, drilling and other waste. The sequence of project and report and the problems that arise at each stage are listed. Possible options for eliminating legislative gaps are outlined.

Key words: re-injection, associated water, drilling waste, regulatory documents.

Потребность в глубинной закачке буровых отходов и промышленных стоков на месторождениях углеводородов Западной Сибири возникла в начале 2000-х годов. Это связано как с быстрым темпом роста количества эксплуатационных скважин, так и с усилением роли экологического подхода к решению вопроса по хранению и размещению отходов производства.

На начальных этапах вопрос решается путем организации шламовых амбаров вблизи кустов скважин. Конструктивно шламовый амбар представляет собой выемку в насыпном основании в форме усеченной пирамиды, прямоугольную в плане, имеющую обваловку из минерального грунта на высоту 0.5 м. Для гидроизоляции на дно и стенки в шламовых амбарах укладывается слой гидроизоляционного материала, который затем покрывается слоем грунта.

Жидкая фаза (буровые сточные воды, отработанный буровой раствор, поверхностные воды (дождевые и талые)) после ее отстоя и осветления откачивается из шламовых амбаров при помощи насосного агрегата в автоцистерны. Далее жидкая фаза вывозится на ближайшие площадки ДНС (ЦПС) или в нефтесборный коллектор (с последующим поступлением жидкой фазы по трубопроводу на очистные сооружения ДНС (ЦПС)). В дальнейшем (после прохождения полного цикла очистки на ДНС) очищенная жидкая фаза используется в системе поддержания пластового давления.

Однако по мере выработки нефтяных залежей происходит рост обводненности добываемой продукции. Следовательно, увеличивается количество попутной воды, объем которой зачастую превосходит потребность системы поддержания пластового давления. Кроме того, в ряде случаев организация системы ППД такова, что использовать в ней попутные воды в принципе нерационально. Возникает так называемый излишек попутных вод, не востребованный системой ППД. А это, в свою очередь, приводит также и к невозможности использования буровых отходов и стоков в системе ППД.

Оптимальным с природоохранной точки зрения вариантом является закачка попутных вод, буровых отходов и других стоков в глубокозалегающий водоносный горизонт, не содержащий залежей полезных ископаемых, обладающий хорошими емкостнофильтрационными свойствами.

Глубинная закачка избытка попутных вод и стоков в непродуктивные горизонты практикуется на месторождениях Западной Сибири не один десяток лет. Принятие и внедрение в практику Федерального закона «О недрах» вызвали необходимость обоснования с геолого-гидрогеологических позиций такой закачки и проведения государственной геологической экспертизы такого рода отчетов. Однако дальнейшее совершенствование

нормативной базы недропользования привело к целому ряду нестыковок в различных документах, которые если не делают невозможной глубинную закачку вообще, то, по крайней мере, не дают однозначного ответа на многие вопросы недропользователей и управления фондом недр.

Одним из таких вопросов является отнесение стоков различного вида к отходам или неотходам. В 2014 г. в ФЗ «О недрах» была введена поправка (ст. 19.1) касательно «размещения попутных вод и вод, использованных для собственных производственных и технологических нужд». В соответствии с понятиями, заложенными в ФЗ «Об отходах производства и потребления», всё, что утратило потребительские свойства, захоранивается, размещается, является отходом. Как мы уже отмечали ранее [1], «Методические рекомендации по обоснованию выбора участков недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых» (рекомендованы протоколом МПР России от 03.04.2007 № 11-17/0044-пр), относят попутные воды к отходам:

- «1.4. К объектам для захоронения отходов (включая радиоактивные) и вредных веществ, возврата в недра использованных или дренажных и попутно извлеченных подземных вод относятся:
- а) системы закачки сточных вод, не содержащих радиоактивных и вредных компонентов;
- б) системы подземного захоронения жидких радиоактивных отходов и вредных веществ;
- в) системы возврата (обратной закачки) в недра попутно извлеченных и использованных минеральных, теплоэнергетических, промышленных дренажных и технических вод;
- г) системы подземного захоронения твердых и отвержденных вредных веществ и отходов (в том числе радиоактивных)».

Однако за три года до указанной поправки в ФЗ «О недрах» вышло памятное многим письмо МПР, в котором попутные воды были выведены из сферы действия законодательства об отходах (но при этом в «Федеральном классификационном каталоге отходов» по состоянию на 2020 г. пластовая вода при добыче сырой нефти и нефтяного (попутного) газа (читай: попутная вода) обозначена отходом под кодом 2 12 121 11 31 4).

Четкого разъяснения, что относится к «водам, использованным для собственных производственных и технологических нужд», и являются ли они отходами, нет нигде. Тем не менее попытки включить, например, хозбытовые стоки в состав флюида, закачиваемого в недра в рамках статьи 19.1 ФЗ «О недрах», заканчиваются отказом в согласовании проектного документа.

Впрочем, и сам процесс проектирования работ на всех стадиях, равно как и написание геологического отчета, наталкивается на препятствия, созданные действующей нормативной базой. Так, ФЗ «О недрах» предусматривает среди прочих такие виды пользования недрами (ст. 6):

- размещение попутных вод и вод, использованных пользователями недр для собственных производственных и технологических нужд при разведке и добыче углеводородного сырья, размещение вод, образующихся у пользователей недр, осуществляющих разведку, добычу и первичную переработку калийных и магниевых солей;
- строительство и эксплуатацию подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых.

Как видим, «размещение попутных вод...» и «строительство и эксплуатация подземных сооружений...» являются разными видами пользования недрами. Захоронение отходов вообще не поименовано в статье «Виды пользования недрами», оно появляется в статье 10.1 «Основания возникновения права пользования участками недр», где существует в двух вариантах: во-первых, как захоронение радиоактивных отходов и отходов 1–5-го классов опасности, и во-вторых, как размещение отходов производства и потребления. При этом право пользования недрами для всех этих случаев возникает по разным основаниям, но

нигде не поясняется, в чем же разница между захоронением и размещением, ведь по  $\Phi$ 3 «Об отходах производства и потребления» это одно и то же, а все отходы имеют какойлибо класс опасности.

В то же время нормативный документ на обоснование закачки един: «Требования к составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по геологической информации об участках недр, намечаемых для строительства и эксплуатации подземных сооружений для хранения нефти и газа, радиоактивных, токсичных и иных опасных отходов, сброса сточных вод и иных нужд, не месторождений полезных ископаемых» (утв. Приказом разработкой Минприроды России от 11.12.2013 № 586). Едины и сами принципы выбора, геологического изучения и обоснования возможности использования недр для всех вышеперечисленных целей. Их устанавливают вышеупомянутые «Методические рекомендации...». Кроме того, они говорят нам о том, что захоронение отходов, стоков, обратная закачка попутных и дренажных вод как вид пользования недрами не связаны с добычей полезных ископаемых. Другой нормативной документации нет, однако в итоге государственной геологической экспертизы недропользователю разрешают (или не разрешают) размещение попутных вод и вод, использованных пользователями недр для собственных производственных и технологических нужд. Напомним, что «размещение» – это термин из законодательства об отходах.

Принципы выбора и геологического изучения таких участков недр понятны. Но при составлении проекта геологического изучения недр неизменно возникает вопрос его отнесения к конкретному типу проектной документации в соответствии с «Правилами подготовки проектной документации на проведение геологического изучения недр и разведки месторождений полезных ископаемых по видам полезных ископаемых» (утв. Приказом Минприроды России от 14.06.2016 г. № 352). Указанный документ выделяет следующие типы проектной документации:

- а) проектная документация на проведение работ по региональному геологическому изучению недр;
- б) проектная документация на проведение работ по геологическому изучению недр, включая поиски и оценку месторождений твердых полезных ископаемых (включая общераспространенные полезные ископаемые), углеводородного сырья, подземных вод;
- в) проектная документация на проведение работ по разведке (доразведке) месторождений твердых полезных ископаемых (включая общераспространенные полезные ископаемые), углеводородного сырья, подземных вод;
- г) проектная документация на проведение работ по геологическому изучению и оценке пригодности участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых.

Казалось бы, если мы говорим о закачке избытка попутной воды как о «размещении попутных вод и вод, использованных пользователями недр ДЛЯ собственных производственных и технологических нужд» в рамках статьи 19.1 ФЗ «О недрах», то нам подойдет тип проектной документации (б), но ст. 6 ФЗ «О недрах» в данном контексте требует доработки, ведь в ней отсутствует такой вид пользования недрами, как геологическое изучение для размещения попутных вод и вод, использованных пользователями недр для собственных производственных и технологических нужд. Зато там есть пункт 2 – «геологическое изучение, включающее поиски и оценку месторождений полезных ископаемых, а также геологическое изучение и оценка пригодности участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых», поэтому можно было бы рассмотреть тип проектной документации (г), но это вряд ли реализуемо, так как получить лицензию на строительство и эксплуатацию подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, на участке, где возник избыток попутных вод, невозможно, так как это участки с уже имеющимися лицензиями на углеводороды.

Помимо проблемы с выбором типа проектной документации встает вопрос о стадийности. Почти дословная цитата из «Методических рекомендаций...»: «Для достижения наибольшей эффективности в изучении участков недр необходимо строго соблюдать стадийность, осуществлять рациональное комплексирование постадийную своевременно проводить геолого-экономическую оценку возможных вариантов решения конкретных задач. Переход от одной стадии к другой производится при положительной оценке государственной геологической экспертизой предыдущей стадии». Какие же это стадии? Те же, что и в любом другом виде геологических работ: поисковая, оценочная, разведочная, эксплуатационная.

Поисковая и оценочная стадии зачастую объединены, выдаваемые лицензии предписывают проводить поиски и оценку пластов-коллекторов для последующей закачки. По окончании работ, согласно «Методическим рекомендациям...», должна быть определена возможность закачки в выбранный горизонт отходов и стоков в необходимом количестве, возможность размещения всех наземных и подземных сооружений объекта, выполнены предварительные расчеты условной схемы объекта, предварительно обоснованы давления закачки, предварительно оценена совместимость закачиваемых веществ с пластовыми водами горизонта, предварительно обосновано отсутствие негативного воздействия на окружающую среду.

Очевидно, что все эти предварительные оценки могут быть сделаны камерально, без бурения поглощающей скважины, ведь бурение скважины — это уже процесс строительства подземного объекта, которое может быть начато лишь после получения необходимых разрешений и согласований. Должны быть привлечены имеющиеся по данному участку материалы геологического изучения для различных целей, материалы по соседним участкам, по объектам-аналогам. При отрицательной оценке принципиальной возможности строительства объекта переход на следующую стадию — разведочную — не осуществляется.

В случае же положительной оценки на выбранном участке проводятся геологоразведочные работы, которые заключаются в бурении поглощающей скважины и проведении длительных опытно-промышленных закачек, что позволит обосновать переход на промышленную эксплуатацию. Фактически же разведка — это первый этап эксплуатационной стадии, потому что основной метод разведки в данном случае — длительные опытно-промышленные закачки.

Особенно чувствительным этот момент является для случая захоронения отходов, поскольку на этапе ГИН даже проведение ОФР с отходами противоречит природоохранному законодательству, ведь у недропользователя к этому времени еще нет лицензии на обращение с отходами, объект захоронения не внесен в ГРОРО — это может быть сделано только после получения протокола государственной геологической экспертизы о переходе к собственно захоронению (как минимум к опытно-промышленному захоронению).

Несмотря на очевидную логичность положений нормативного документа, при государственной геологической экспертизе возникают формулировки вроде «проведения второго этапа геологического изучения с проведением опытно-промышленной закачки».

Согласно «Требованиям к структуре и оформлению проектной документации на строительство и эксплуатацию подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых» (утв. Приказом Минприроды России № 464 от 27.10.2010 г.), мероприятия по опытной закачке включаются в технический проект на строительство и эксплуатацию подземных сооружений, поэтому в проектную документацию на геологическое изучение недр подлежит включению только обоснование необходимости проведения опытнопромышленной закачки, а непосредственно проектирование ОПЭ может осуществляться только в технических проектах на проведение ОПЭ. Это подтверждает и письмо Минприроды за подписью О.С. Каспарова от 02.02.2018 г. (исх. № ОК-03-30/1337): «Проектирование работ по опытно-промышленной закачке с обоснованием проектных решений по объемам и срокам проведения данных работ может осуществляться исключительно в технических проектах на проведение данных работ. В проектную

документацию на геологическое изучение недр подлежит включению только обоснование необходимости проведения работ по опытно-промышленной закачке».

Таким образом, и нормативные документы неоднозначны, и трактовки их различными специалистами могут быть полярны. В итоге пути легализации глубинной закачки в разных регионах и на разных этапах реализуются различными способами, причем даже после того как недропользователь все же получил каким-то образом разрешение на размещение попутных вод (не имеющих определения), он приступает к составлению проектной документации на эксплуатацию данного участка (опытно-промышленную или промышленную) в соответствии с «Требованиями к структуре и оформлению проектной документации...». В терминологии данного нормативного документа тоже фигурируют понятия: строительство и эксплуатация подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, размещение/захоронение, отходы.

Недропользователь находится в тупиковой ситуации, он готов действовать по закону, но несогласованность нормативной базы приводит к тому, что каждый орган решает задачу лишь на подведомственном ему отрезке, а в целом цепочка разрешительной документации не является связной.

Для юридически верного и единообразного подхода к вопросам по глубинному размещению необходимо провести актуализацию нормативно-правовой и методической базы в области обоснования участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых. Наши предложения в этом направлении были даны ранее [1]. Дополнительно предлагаем следующее:

- внести корректировки в  $\Phi 3$  «О недрах» в части урегулирования спорных вопросов, связанных с закачкой попутных вод, хозяйственно-бытовых стоков и буровых отходов в недра, где четко прописать, что всё это относится к виду пользования недрами «строительство и эксплуатация подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых»;
- разработать методические рекомендации по составлению проектной документации на этап геологического изучения недр и разведки месторождений подземных вод, а также на этап геологического изучения недр для закачки сточных вод в глубокие водоносные горизонты.

#### Список литературы

1. Боровская Т.А., Павленко О.Л. «Правовые проблемы, связанные с размещением в пластах горных пород попутных вод и вод, использованных пользователями недр для собственных производственных и технологических нужд. // Недропользование XXI век. Межотраслевой научно-технический журнал. Февраль 2019 г. №1 (77). С. 66–71.

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ПОЛИГОНОВ ДЛЯ СКЛАДИРОВАНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ОЛЬХОНСКОМ РАЙОНЕ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-532-533

#### Попов В.Н.

ООО НПФ «Аквастрим», пос. Большая Речка, Иркутская область, irk.popovvn@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматривается проблема размещения полигонов в Ольхонском районе для складирования и изоляции бытовых отходов. Приводится характеристика гидрогеологических условий существующего полигона Имел-Кутул. Даются рекомендации по выбору мест размещения полигонов исходя из благоприятных гидрогеологических условий.

Ключевые слова: гидрогеологическое обоснование, полигон, монолитный безводный массив.

**Abstract.** The problem of placing landfills in the Olkhonsk region for storage and disposal of household waste is considered. The characteristics of the hydrogeological conditions of the existing Imel-Kutul landfill are given. Recommendations are given on the selection of landfill sites based on favorable hydrogeological conditions.

Key words: hydrogeological substantiation, landfill, monolithic waterless massif.

Гидрогеологические условия имеют важное значение при выборе мест заложения полигонов складирования твердых и жидких бытовых отходов (ТБО и ЖБО). Возможное загрязнение подземных вод может нанести непоправимый вред подземным источникам водоснабжения. Ситуация, которая сложилась в Ольхонском районе с хаотичным и необоснованным размещением свалок бытового мусора, становится критической. Также она усугубляется развитием туризма, строительством баз отдыха, частных поселений и других видов освоения территории.

Ольхонский район занимает полосу вдоль побережья озера Байкал протяженностью 370 км, площадью 15.9 тыс. км<sup>2</sup>. Здесь находится одно городское и пять сельских поселений, в состав которых входит 35 населенных пунктов. Численность коренного населения составляет около 10 тыс. человек.

Одной из первоочередных экологических проблем района является изоляция бытовых отходов. По заказу администрации Ольхонского района в 2013 г. ООО ОПКТБ «Экоинж» (г. Санкт-Петербург) разработало схему санитарной очистки территории. Однако одна из главных задач — выбор площадок для размещения полигонов складирования и утилизации ТБО и ЖБО с учетом геолого-экологической обстановки — осталась нерешенной. Начиная с 2005 г. проводятся организационные работы по открытию официального полигона Имел-Кутул. Полигон находится в предгорной части Приморского хребта, в верхней части одноименной пади, в 7 км юго-западнее залива Мухор. Полигон площадью 6.3 га сложен монолитными метаморфическими и изверженными породами. В 2005—2007 гг. проводились детальные исследования по изучению инженерно-экологических условий в границах полигона. В 2007 г. полигон был открыт, а на полную мощность стал действовать с 2012 г. В 2013 и 2017 гг. продолжались работы по доизучению гидрогеологических условий.

Скважины глубиной 63 м (2012 г.) и 131 м (2017 г.) не вскрыли водоносных горизонтов до глубины 123 м. Посредством наливов были определены коэффициенты фильтрации: для дресвяно-щебенистых пород с суглинистым заполнителем — 1.51 м/сут (глубина залегания составляет 2–3 м); для коренных пород, трещиноватых до состояния щебня, — до 14.38 м/сут (глубина залегания от 2 м до 6.3 м) и для пород в интервале глубин от 6.3 до 123 м — менее 0.001 м/сут. В 2017 г. администрацией Ольхонского района получено заключение от ООО НПФ «Аквастрим» о нецелесообразности мониторинга качества подземных вод на полигоне Имел-Кутул по причине их отсутствия в границах возможного загрязнения.

Следует пояснить данное утверждение детально. При изысканиях ВостСибТИСИЗа на площадке полигона в 2007 г. до глубины 9 м подземные воды не обнаружены. Эта же организация в 2012 г. пробурила скважину 1 до глубины 63 м рядом с полигоном. Вода в

скважине периодически, исключительно летом, появлялась, по-видимому, за счет атмосферных осадков и разгерметизации оголовка скважины. На привнос воды с поверхности указывает результат бактериологического анализа. Откуда на глубине 63 м, под практически непроницаемыми породами, могла появиться вода с содержанием общего микробного числа более 50 КОЕ/мл? В июне 2017 г. эта скважина при обследовании была признана безводной.

Пробуренная в июне 2017 г. АО «Урангео» скважина 2 глубиной 131 м в непосредственной близости со скважиной 1 в интервале 123-126 м вскрыла подземные воды в зоне тектонической трещиноватости. Уровень воды за 4 ч в результате местного напора поднялся до 89.55 м. Менее чем за 4 мин вода полностью была откачана насосом с производительностью 2 м<sup>3</sup>/час. Появление ее в скважине отмечено только через 2 ч 10 мин. Это свидетельствует о весьма слабой водоотдаче. Осуществлять мониторинг изменения состава этого типа подземных вод не имеет смысла, так как они, по-видимому, не имеют тесной взаимосвязи с другими водоносными горизонтами вне пади Имел-Кутул. Полигон сложен породами весьма слабой проницаемости с коэффициентом фильтрации менее 0.001 м/сут. Об этом свидетельствуют и многочисленные озера в районе полигона. Для оценки возможного загрязнения водоносного горизонта в верхней трещиноватой зоне за счет горизонтальной инфильтрации в декабре 2017 г. из скважины у кафе «Надежда», пробуренной на расстоянии 6.5 км от полигона вниз по пади Имел-Кутул, в интервале глубины 15-25 м была отобрана проба воды на химический анализ. Его результаты показали, что подземные воды не имеют даже следов загрязнения. Проба отобрана в 2017 г., а полигон интенсивно действует с 2012 г., т.е. за пять лет возможное загрязнение должно было 452 сут при коэффициенте фильтрации 14.38 м/сут. Следует отметить, что с точки зрения гидрогеологических условий размещение полигона Имел-Кутул выбрано удачно, так как породы в основном монолитные, безводные. На эту особенность еще в 1962 г. обращено внимание при гидрогеологической съемке масштаба 1:200 000.

Необходимо обратить внимание еще на одну закономерность. Вблизи берега озера Байкал, например в поселках Сахюрта, Куркут и др. на о. Ольхон, подземные воды на участках распространения монолитных пород вскрываются всегда ниже уреза воды в оз. Байкал на 20–30 метров. Однако их статический уровень всегда устанавливается на уровне уреза воды в оз. Байкал. Это свидетельствует о прямой гидравлической взаимосвязи между ними. При этом подземные воды надежно экранируются с поверхности мощной толщей безводных монолитных пород.

Приведенные примеры показывают, что полигоны ТБО и ЖБО возможно и необходимо размещать на участках, сложенных безводными монолитными массивами метаморфических и изверженных пород. Также следует уделить внимание участкам, сложенным водонепроницаемыми неогеновыми глинами, мощность которых может достигать 100 м, но чаще всего составляет 25–30 м.

Для выявления мест размещения полигонов основой могут служить геологические карты масштаба 1:200 000. Косвенным признаком, указывающим на непроницаемость пород, служат озера, имеющие достаточно широкое распространение в Ольхонском районе. Осложняющим фактором могут быть участки распространения мраморов. Следует обратить внимание на возможное проявление карста, нередко встречающегося в районе (пещера «Мечта» и др.).

При изучении участков, потенциально пригодных для размещения полигонов, необходимо проводить площадные геофизические работы, сопровождаемые бурением одной или двух опорных гидрогеологических скважин. Опыт показывает, что глубже 50 м такие исследования проводить нецелесообразно.

### ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГИДРОСФЕРЫ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА р. ТАГИЛ, СРЕДНИЙ УРАЛ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-534-538

Рыбникова Л.С., Наволокина В.Ю.

Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, luserib@mail.ru, vunavolokina@gmail.com

Аннотация. Горнодобывающая деятельность приводит к формированию природно-технических систем. Закрытие рудников выявило специфические проблемы, связанные с медленными процессами самореабилитации и высоким уровнем загрязнения гидросферы. На Среднем Урале в бассейне р. Тагил расположено несколько затопленных рудников, на которых продолжают формироваться кислые шахтные воды. Несмотря на нейтрализацию, сточные воды загрязняют гидросферу металлами. Их концентрации в поверхностных водах превышают предельно допустимые в десятки и сотни раз. Массив информации об этих объектах накопленного вреда окружающей среды включает несколько тысяч анализов и является основой баз данных системы геоинформационного мониторинга. Анализ степени загрязнения гидросферы выполняется на основании данных геоинформационного мониторинга с использованием системы индикаторов. Количественно охарактеризовано влияние каждого из объектов на кумулятивное загрязнение гидросферы р. Тагил и эффективность самореабилитации.

**Ключевые слова:** медно-колчеданные рудники, затопление, бассейн р. Тагил, загрязняющие вещества, гидросфера.

Abstract. Mining activity leads to the formation of natural and technical systems. The closure of mines both in the Middle Urals and around the world revealed specific problems associated with slow self-rehabilitation processes in mining areas and a high level of pollution of the hydrosphere. In the Middle Urals in the basin of the river. Tagil has several mines flooded at the end of the last century, on which acidic mine waters continue to form. Despite neutralization and settling in clarification ponds, wastewater pollutes the hydrosphere with metals such as copper, zinc, iron, manganese. Their concentrations in surface waters exceed the maximum permissible values by tens and hundreds of times. The array of information on these objects of accumulated environmental damage includes several thousand analyzes and is the basis for the databases of the geoinformation monitoring system. Analysis of the degree of pollution of the hydrosphere, identification and ranking of objects according to the degree of pollution is carried out on the basis of geoinformation monitoring data using a system of indicators. The influence of each of the objects on the cumulative pollution of the hydrosphere of the Tagil River and the effectiveness of self-rehabilitation in its upper reaches is quantitatively characterized.

Key words: abandoned mine, Tagil River, pollutants, hydrosphere.

#### Введение

Образование кислых шахтных вод является одной из основных экологических проблем, связанных с горнодобывающей промышленностью во всем мире. Источником негативного воздействия на окружающую среду являются действующие и ликвидированные шахты, породные отвалы, пруды-осветлители [1, 2].

На Среднем Урале среди основных источников негативного воздействия на окружающую среду в первую очередь необходимо отметить закрытые и ликвидированные медно-колчеданные рудники. В результате затопления медно-колчеданных рудников в конце прошлого — начале этого века сформировались техногенные водоемы с выходом шахтных вод на поверхность. Расход их разгрузки составляет около половины шахтного водоотлива при полном развитии горных работ. В химическом составе преобладает железо, цинк, алюминий, марганец, медь содержание которых в сотни и тысячи раз превышает предельно допустимые концентрации, при этом вода является кислой (рН = 3-4) [3]. Формирование химического состава шахтных вод происходит в нестационарном режиме, что осложняет процесс очистки и приводит к значительному загрязнению гидросферы. Для очистки шахтных вод проводится нейтрализация известковым молоком и отстаивание в прудахосветлителях. Значительная часть металлов выпадает в осадок, степень очистки варьируется от 50 до 90 % [4], однако в воде, сбрасываемой в поверхностные водотоки, сохраняется превышение ПДК.

Согласно данным государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2018 году», суммарный сброс шахтных и коллекторно-

дренажных вод в поверхностные водные объекты составляет более 700 млн  ${\rm M}^3$ , из них загрязненных сточных вод около 80 % [5].

Целью работы является оценка состояния гидросферы природно-технических систем горнопромышленных районов. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: проведен анализ и обработка данных горно-геологического мониторинга, обосновано использование системы индикаторов, отражающих степень негативного влияния горно-геологических объектов на окружающую среду. Объект исследования — гидросфера бассейна р. Тагил от истоков до Леневского пруда, который является одним из источников водоснабжения г. Нижний Тагил (население 356 тыс. чел.).

#### Материалы и методы

Река Тагил берет начало на восточном склоне Среднего Урала, течет преимущественно на северо-восток, впадает в Туру (Обь-Иртышский бассейновый округ). Река протянулась на 414 км, площадь бассейна 10.1 тыс. км² (рисунок).

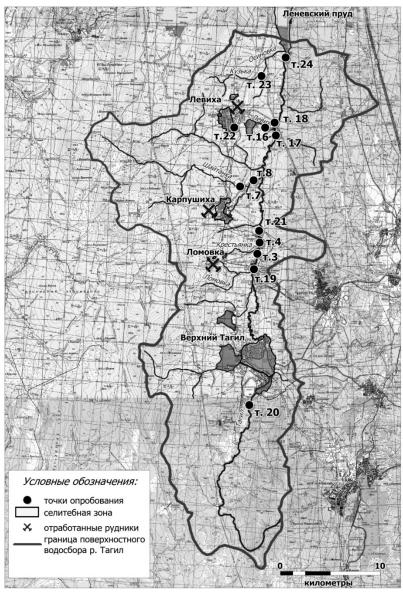


Схема местоположения горно-геологических объектов и пунктов геоинформационного мониторинга в бассейне р. Тагил.

Начиная с 2007 г. в районе затопленных рудников (Ломовскоий, Карпушихинский, Левихинский) проводится мониторинг состава шахтных и поверхностных вод. Еженедельно определяются pH,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Fe_{общ}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ , сухой остаток, взвешенные вещества,

нефтепродукты, мышьяк. Для их анализа используются потенциометрический, фотометрический и гравиметрический методы. Пункты наблюдений на каждом из объектов расположены в месте разгрузки шахтных вод, на сбросе с пруда-осветлителя, в рекеприемнике сточных вод (до и после сброса). Общий массив информации на этих объектах накопленного вреда окружающей среды включает более 10 тысяч химических анализов и является основой баз данных системы геоинформационного мониторинга.

#### Результаты и обсуждение

Превышения предельно допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного значения (ПДКрх) фиксируются уже в верховьях р. Тагил (таблица). Такие превышения характерны для многих рек Свердловской области; например в р. Тура зафиксированы такие превышения для железа, марганца в 3–6 раз [6].

Содержание компонентов (мг/л) в водных объектах бассейна р. Тагил (средние значения за  $2019 \, \Gamma$ .)

20191.		Компоненты						
№ точки	Место отбора пробы	рН	Cu <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>	Fe <sub>общ</sub>	Mn <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Суммарный
			показатель загрязнения,					
		6.5-	0.001	0.01	0.1	0.01	100	Zc
		8.5						20
20*	р. Тагил, верховье	7.3	0.004	0.01	0.5	0.03	18	10
20			(4)	(1)	(5)	(3)		
19*	р. Тагил, ниже г. Верхний	7.5	0.009	0.01	0.4	0.1	38	21
17	Тагил		(9)	(1)	(4)	(10)		
3	р. Тагил, выше сброса с	7.6	0.02	0.02	0.7	0.012	43	27
3	Ломовского рудника		(20)	(2)	(7)	(1)		
4	р. Тагил, ниже сброса с	7.7	0.02	0.03	0.7	0.012	38	28
7	Ломовского рудника		(20)	(3)	(7)	(1)		
21*	р. Тагил, деревня Тепловая	8.1	0.007	0.01	0.4	0.067	40	16
21			(7)	(1)	(4)	(7)		
	р. Шайтанка, выше сброса	7.3	0.01	0.02	0.4	0.035	2.8	17
7	с Карпушихинского		(10)	(2)	(4)	(4)		
	рудника							
8	р. Шайтанка, ниже сброса с	7.1	0.02	0.02	0.4	0.04	5.4	27
0	Карпушихинского рудника		(20)	(2)	(4)	(4)		
22*	р. Левиха, верховье	7.9	0.01	0.01	0.5	0.06	70	19
			(10)	(1)	(5)	(6)		
17	р. Тагил, выше сброса с	7.8	0.01	0.01	0.5	0.096	31	23
17	Левихинского рудника		(10)	(1)	(5)	(10)		
	Р. Левиха, устье	7.1	2.46	39.82	2.6	22.46	2331	8709
16			(2460)	(3982)	(26)	(2246	(23)	
						)		
18	р. Тагил, ниже сброса с	7.1	0.14	1.86	1.4	1.18	146	455
	Левихинского рудника		(140)	(186)	(14)	(118)	(1.5)	
23*	р. Кузька /р. Осиновка	8.1	0.01	0.01	1.1	0.17	13	36
			(10)	(1)	(11)	(17)		
24*	р. Тагил, Леневское	7.8	0.03	0.39	0.3	0.74	82	143
<b>4</b> 7	водохранилище		(30)	(39)	(3)	(74)		

Примечание. В скобках – коэффициент концентрации загрязняющего вещества; \* – пункт наблюдений за фоновым составом.

Самые значительные превышения ПДКрх наблюдаются после сброса очищенных шахтных вод Левихинского рудника в устье р. Левиха – для цинка (3982 раз), меди (2460 раз), марганца (2246 раз). Аномальное содержание металлов здесь объясняется, во-первых, повышенным содержанием компонентов в верховьях реки: фоновые концентрации

превышены для железа (в 5 раз), марганца (в 6 раз), меди (в 10 раз). Во-вторых, исходные концентрации в шахтных водах Левихинского рудника гораздо выше (по цинку и железу в 35 и 159 раз), чем содержание этих компонентов в шахтных водах Ломовского и Карпушихинского рудников. В-третьих, расход шахтных вод на Левихинском руднике составляет около 3 тыс. м³/сут, это в 10–20 раз больше, чем на Карпушихинском и Ломовском рудниках. В-четвертых, длина русла р. Левиха от места сброса очищенных шахтных вод из пруда-отстойника до ее устья составляет всего 1.4 км, причем в нижней части русло реки спрямлено, в результате чего вода после отстаивания течет слишком быстро и не успевает провзаимодействовать с реагентами [4]. В результате ниже сброса с Левихинского рудника содержания металлов в р. Тагил превышают ПДКрх по цинку в 186 раз, меди — в 140 раз, марганцу — 118 раз (таблица).

Для интегральной оценки воздействия на окружающую среду эффективно использование индикаторов состояния, которые дают характеристику физических, биологических, химических параметров для конкретной территории. Такие индикаторы могут описывать концентрацию металлов в почвах, донных отложениях, поверхностных и подземных водах и т.д. [1].

В качестве индикаторов состояния гидросферы в бассейне реки Тагил были выбраны два показателя: коэффициент концентрации загрязняющего вещества  $(K_c = C_i/C_{\Pi,\Pi K})$  и суммарный показатель загрязнения  $(Zc = \sum_{i=1}^n K_c - (n-1))$  [8].

Значения Zc по течению р. Тагил изменяются от 10 в верховьях до 455 ниже сброса очищенных шахтных вод Левихинского рудника. Самое высокое значение Zc, более 8 тысяч, фиксируется в устье р. Левиха (т. 16). В условно фоновых точках Zc не превышает 36. На некоторых участках отчетливо прослеживается самоочищение речной воды за счет поступления с незагрязненных водосборов. На участке после сброса сточных вод Левихиского рудника до Леневского пруда происходит трехкратное очищение воды р. Тагил, однако в Леневский пруд поступает вода, у которой суммарный показатель загрязнения Zc равен 143.

Ситуация, сложившаяся в настоящее время в бассейне р. Тагил, определяется наличием здесь отработанных медно-колчеданных рудников, в первую очередь Левихинским. Продолжительность формирования кислых шахтных вод может составлять десятки и даже сотни лет [3].

Для управления процессом и улучшения состояния гидросферы бассейна р. Тагил в настоящее время для Левихинского медно-колчеданного рудника разрабатываются мероприятия по оптимизации системы очистки кислых шахтных вод [9]. Одним из решений может быть организация пассивной системы очистки в виде каскада прудов дополнительно к существующему пруду-осветлителю. Такие системы хорошо зарекомендовали себя на объектах завершенной добычи [10].

#### Заключение

На основе данных геоинформационного мониторинга с использованием системы индикаторов выполнен анализ степени загрязнения гидросферы, выявлены и ранжированы объекты по степени негативного влияния горно-геологических объектов на окружающую среду.

Бассейн р. Тагил испытывает кумулятивное воздействие ряда источников природного и техногенного загрязнения. В точках, где отсутствует антропогенная нагрузка, суммарный показатель загрязнения варьируется от 10 до 36. Негативное влияние оказывает сток рек Крестьянка, Шайтанка и особенно Левиха, куда осуществляется сброс очищенных сточных вод отработанных медно-колчеданных рудников. На участках, где находятся незатронутые антропогенной деятельностью водосборы, происходит самоочищение воды.

В устье р. Левиха концентрации цинка, меди, марганца превышают установленные нормативы в тысячи раз, суммарный показатель загрязнения составляет более 8 тысяч. Р. Левиха полностью потеряла свой первоначальный гидрохимический облик и является ведущим источником загрязнения в бассейне р. Тагил. Ниже сброса очищенных сточных вод

с территории отработанного Левихинского месторождения степень загрязнения р. Тагил возрастает в 20 раз. Благодаря поступлению относительно чистых вод на участке водосбора ниже р. Левихи при впадении в Леневский пруд (один из источников водоснабжения г. Нижний Тагил), суммарный показатель загрязнения снижается до 143, качество воды в р. Тагил существенно улучшается (степень разбавления поверхностных вод составляет 3). Тем не менее содержание основных загрязняющих компонентов сохраняется на высоком уровне – превышения ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения достигают 30–70 раз.

Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований РАН, тема 0405-2019-0005 и 0328-2019-005 в соответствии с планом 2019-2021 гг. и при поддержке РФФИ, проект 20-45-660014.

#### Список литературы

- 1. Lottermoser B. Environmental Indicators in Metal Mining. Springer International Publishing Switzerland, 2017. 413 p.
- 2. Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites // Applied Geochemistry. 2015. № 57. P. 17–34.
- 3. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // Геохимия. 2019. Т. 64, № 3. С. 282–299.
- 4. Рыбникова Л.С., Наволокина В.Ю. Оценка состояния гидросферы в верховьях бассейна реки Тагил (Свердловская обл.) // Проблемы недропользования. 2020. № 2 (25). С. 81–89.
- 5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2018 году». Екатеринбург: ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2019. 309 с.
- 6. Экосистема реки Туры в XXI веке. Часть І. Ретроспектива / Л.В. Михайлова, А.К. Матковский, Е.А. Исаченко-Боме, А.И. Коваленко, Н.С. Князева и др. // Вестник рыбохозяйственной науки. 2016, Т. 3, № 3 (11). С. 34–54.
- 7. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. М.: Изд-во ВНИРО, 2011. 257 с.
- 8. МУ 2.1.7.730-99. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Методические указания. М.: Минздрав РФ, 1999.
- 9. Рыбникова Л.С., Наволокина В.Ю. Обоснование мероприятий по минимизации воздействия кислых шахтных вод на гидросферу (на примере Левихинского медноколчеданного месторождения, Свердловская обл.) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. (в печати).
- 10. Engineering guidelines for the passive remediation of acidic and/or metalliferous mine drainage and similar wastewaters. European Commission 5th Framework RTD Project no. EVK1-CT-1999-000021 "Passive in-situ remediation of acidic mine/industrial drainage" (PIRAMID). PIRAMID Consortium. Newcastle Upon Tyne, UK: University of Newcastle Upon Tyne. 2003. 166 p.

## ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ (СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-539-542

Рященко Т.Г., Маслов Е.А. Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ryashenk@crust.irk.ru

Аннотация. В статье рассматривается состояние проблемы по иженерной геологии месторождений твердых полезных ископаемых в СССР — России и опыт изучения скальных грунтов Албазинского месторождения на севере Хабаровского края. При исследовании истории развития указанной проблемы выделены следующие этапы: 70–80-е годы прошлого столетия (СССР), 90-е годы (Россия), ХХІ век — современные методические подходы и научные направления (Россия — МАИГ). Предложена методическая схема инженерно-геологической оценки скальных грунтов изучаемого Албазинского месторождения, которая на примере специальной коллекции образцов включает комплексную информацию о физических и сейсмических свойствах, петрографическую характеристику и анализ их взаимосвязей, что соответствует рекомендациям современного этапа развития инженерной геологии месторождений.

**Ключевые слова**: инженерная геология месторождений, этапы, скальные грунты, свойства, взаимосвязи.

**Abstract.** The article considers the state of problem «Engineering geology of solid commercial mineral deposits» in the USSR–Russia and studying experience of the rocky soils of the Albazinskiy deposit in the north of the Khabarovsk Territory. The following stages were highlighted in the study of the development history of this problem: 70-80 years of the last century (the USSR); 90s (the Russia); XXI century with modern methodological approaches and scientific directions (the Russia – IAEG). The methodological scheme for the engineering-geological assessment of the rocky soils of the studied Albazinskiy deposit was proposed. This scheme includes complex information on physical and seismic properties, petrographic characteristic and analysis of their interrelationships on the example of the special collection of samples. It corresponds to the modern stage recommendations of development of engineering geology of deposits.

Keywords: engineering geology of deposits, stages, rocky soils, properties, interrelationships.

В первой научной монографии «Инженерная геология» («Engineering Geology»), опубликованной в 1880 г. в Лондоне британским геологом и инженером-строителем Уильямом Генри Пеннингом (1838–1902 гг.), инженерная геология определяется как приложение к запросам строителей. Относительно «главенства целей», стоящих перед людьми в прошлом и настоящем, можно привести следующее высказывание современников: «При этом нам кажется неправомерным считать, что развитие геологических наук связано с появлением у человека потребности в добыче полезных ископаемых, используемых для бытовых целей (орудия производства, охота), вооружения, строительства, энергетических и других нужд. Прежде всего, человеку нужно было обустроить свое жилище» [1]. Таким образом, главной задачей так называемой «доклассической геологии» являлось выполнение «инженерно-геологических изысканий» – нахождение пригодной для жизни «площадки». Однако при подготовке геологов в вузах одной из самых распространенных и нужных была и есть специальность «поиски и разведка полезных ископаемых» (так называемые «группы полезников»). Тем не менее достаточно давно при проектировании и разработке месторождений существует тесная связь с инженерно-геологическими исследованиями, которые включают все основные разделы науки «инженерная геология». Кроме того, необходима информация о характере обводненности месторождений, следовательно, гидрогеолог всегда присутствует в составе группы специалистов, работающих при эксплуатации этих месторождений.

По классификации А.Г. Бетехтина выделяются следующие типы месторождений твердых полезных ископаемых: *первый класс* — металлические с содержанием черных, цветных, легких и благородных металлов; месторождения с содержанием в породах радиоактивных элементов; с присутствием в породах редких металлов и редкоземельных элементов; *второй и третий классы* — неметаллические и твердые горючие полезные ископаемые. Инженерно-геологические условия перечисленных месторождений включают

материалы основных разделов инженерной геологии и гидрогеологии. Таким образом, любое месторождение твердых полезных ископаемых (в настоящее время это преимущественно открытые разработки) можно рассматривать как природно-техническую систему (ПТС), которую на современном этапе развития инженерной геологии (возможно, и в недалеком будущем) следует считать наиболее перспективным научным направлением.

В предлагаемой статье рассматриваются две стороны вопроса – состояние проблемы по инженерной геологии месторождений твердых полезных ископаемых в СССР – России и опыт изучения скальных грунтов на примере конкретного месторождения.

Историю развития изучаемой проблемы можно разделить на следующие этапы (не включая начальные периоды): 70–80-е годы прошлого столетия (СССР), 90-е годы (Россия), XXI век — современные методические подходы и научные направления (Россия; рекомендации на международном уровне — XII Конгресс МАИГ).

Исследования первого этапа (СССР) связаны с именами таких советских ученых, как П.Н. Панюков, С.В. Трояновский, Н.И. Плотников, С.П. Прохоров, М.Е Певзнер, Б.В. Смирнов, С.И. Малинин, Г.А. Голодковская, Л.В. Шаумян, В.Д. Ломтадзе, Е.М. Пашкин, А.Э. Даммер, С.В. Квашук, В.Е. Ольховатенко и др. В этот период были разработаны многочисленные инструкции по безопасному ведению работ на шахтах и карьерах; в числе первых публикаций оказались результаты исследований, которые выполнялись в МГУ под руководством Г.А. Голодковской [2]. Известна коллективная монография «Гидрогеологические исследования в горном деле» [3], а также работа, посвященная инженерно-геологическим особенностям железорудных месторождений [4]. Особое место занимают труды В.Д. Ломтадзе, поскольку один из его многочисленных учебников для вузов так и называется «Инженерная геология месторождений полезных ископаемых» [5].

Длительные региональные исследования инженерно-геологических условий южной части Хабаровского края проводились в 90-е годы (второй этап — Россия). Обобщение полученных материалов было выполнено в виде монографии, в которой представлены комплексные данные по составу и свойствам скальных грунтов [6]. Авторы монографии на конкретном региональном материале рассматривают пути решения геоэкологических задач при освоении и эксплуатации месторождения в условиях открытой разработки.

Современный этап – нулевые годы XXI в. В этот период были опубликованы две крупные монографии. Первая посвящена месторождениям – «Оценка и прогноз инженерногеологических условий месторождений твердых полезных ископаемых горно-складчатых областей» [7]. В этой докторской работе И.В. Абатуровой рассматриваются принципы оценки и прогноза инженерно-геологических условий уранового месторождения «Элькон» на севере Восточной Сибири. Объект расположен в пределах Алданского щита в зоне Южного разлома архейско-протерозойского заложения; распространены крупного метаморфическая (гнейсы, сланцы) и магматическая (гранитоиды) формации. Выделены основные компоненты инженерно-геологических условий; установлены наиболее важные показатели при оценке трещиноватости; предложены принципы общей типизации месторождений. Вторая монография – О.Н. Грязнова «Инженерно-геологические условия Урала» – относится к числу крупных региональных работ [8]. Тем не менее в специальном разделе уделяется особое внимание месторождениям золото-аргиллизитовой формации - на примере Светлинского участка приведены обобщенные данные физико-механических свойств петрографических типов скальных грунтов, в метаморфическом комплексе установлена анизотропия по прочности.

К числу оригинальных работ современного периода относятся две статьи: первая посвящена оценке полей напряжения в окрестностях Кольской сверхглубокой скважины [9], вторая — опыту применения геомоделей для изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород методами математического моделирования [10]. Далее обратимся к известному событию — XII конгрессу МАИГ (2014 г., Италия, Турин). В рамках проблемы «Скальные грунты» в программе конгресса выделены следующие научные

направления: анализ природы их физико-механических свойств, трещиноватости и механизма разрушения; особое место занимали вопросы оценки свойств скальных массивов, для которых были предложены специальные индексы [11]. Рекомендуется изучать зависимость физико-механических свойств грунтов от их структурно-минералогических особенностей, которые определяются на микроуровне (петрографические шлифы, РЭМ), а также количественные корреляционные зависимости между различными показателями физико-механических и сейсмических свойств.

Согласно предложенным рекомендациям были исследованы скальные грунты Албазинского месторождения. Для специальной коллекции образцов, отобранных в карьере, получена комплексная информация по показателям физических и сейсмических свойств и петрографическим особенностям (шлифы); проведен количественный анализ взаимосвязей физических (плотность, пористость, водопоглощение) и сейсмических (скорость распространения продольных сейсмических волн) свойств с помощью программы кластерного анализа R-типа.

Албазинское месторождение (фондовые материалы) расположено в пределах Ульбанской структурно-формационной зоны Сихотэ-Алинской складчатой области. Выделяются три структурных этажа: нижний представлен юрскими осадочными породами со следами метаморфизма (метапесчаники), средний – эффузивами порфировой формации (дациты, андезиты) среднемелового возраста, верхний – четвертичными отложениями. Рельеф территории низкогорный (абс. отм. 400-600 м), сильно расчлененный; подземные воды залегают на глубине от 5 до 44 м, выделяются временный водоносный горизонт (верховодка) и трещиноватая зона юрско-меловых пород. По документации керна скважин, результатам определения прочности (на одноосное сжатие – Rc, МПа) и показателя качества (ROD, %) скальных грунтов на месторождении выделены две группы: Rc18–51, ROD <25–50 (качество массива очень плохое) и Rc53-153, RQD>50-75 (качество массива среднее и хорошее). Для метапесчаников и дацитов (участки «Екатерина-2», «Фарида») представлены обобщенные данные прочности на одноосное сжатие (Rc, МПа) и растяжение (Rz, МПа), а также природной плотности (Рпр, г/см<sup>3</sup>), на основе которой авторы представляемой статьи составили матрицу (n=6, m=3) и по программе кластерного анализа R-типа построили график-дендрограмму (рис. 1).

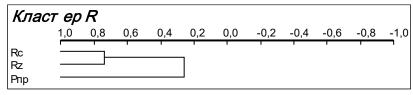


Рис. 1. Взаимосвязи прочности и природной плотности скальных грунтов.

Установлена «аномальная» зависимость – природная плотность скальных грунтов (метапесчаников и дацитов) не влияет существенно на их прочность, поскольку коэффициент корреляции (горизонтальная ось на графике) менее 0.40 (0.27). Аналогичная «аномалия» была выявлена при изучении протерозойских песчаников Удокана, для которых ведущими факторами оказались особенности их микроструктуры и микротекстуры, установленные при изучении петрографических шлифов [12].

Для образцов коллекции в ИЗК СО РАН определены природная плотность (Рпр, г/см³) гидростатическим методом, плотность минеральной части (Рs), пористость (n, %) и водопоглощение (Wвп, %). Затем для каждого образца выполнено измерение скорости распространения продольных сейсмических волн («сейсмическая скорость» – Vp, м/с) с помощью прибора «Пульсар-2.2: измерение времени и скорости распространения ультразвука». Кроме того, были изготовлены петрографические шлифы, при просмотре и описании которых определены особенности микроструктуры и микротекстуры, минеральный состав, признаки кластогенеза и бластогенеза. Эта информация была приведена ранее в

Трудах Международной научной конференции «Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии» [13].

Установлено, что скорость распространения продольных сейсмических волн (Vp) заметно выше в метапесчаниках (в среднем 6061 м/c), чем в дацитах (4077 м/c). Видимо, главная причина этих различий — величина пористости (метапесчаник — 0.2 %, дацит — 1.4 %; соответственно изменяется и водопоглощение — 0.08 % в песчанике, 0.53 % в даците), которая связана с признаками структуры, текстуры, состава, процессами кластогенеза и бластогенеза (природные плотности почти не различаются — 2.67—2.65 г/см<sup>3</sup>).

Для восьми образцов коллекции с тремя признаками (Рпр, n, Vp) с помощью кластерного анализа R-типа построена дендрограмма, по которой установлено, что «сейсмическая скорость» (Vp) имеет заметную, но обратную взаимосвязь (коэффициент корреляции составляет –0.45) с пористостью; с природной плотностью связи отсутствуют (рис. 2).

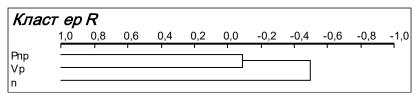


Рис. 2. Взаимосвязи «сейсмической скорости» (Vp), пористости (n), природной плотности (Pпp) в скальных грунтах (n=8, m=3).

Следовательно, в метапесчаниках меньше пористость, выше Vp (значит, больше прочность), в дацитах – выше пористость, ниже Vp (значит, меньше прочность).

При участии всех показателей физических свойств (Wвп, n, Pпр, Ps) и «сейсмической скорости» (Vp) на дендрограмме обнаружены те же зависимости.

Таким образом, при анализе как прочности, так и «сейсмической скорости» скальных грунтов необходима дополнительная информация петрографического характера, которая на качественном уровне определяет некоторые «аномалии».

## Список литературы

- 1. Королев В.А., Трофимов В.Т. Инженерная геология: история, методология и номологические основы. М.: Изд-во «КДУ», 2016. 297 с.
- 2. Инженерно-геологические исследования при разведке месторождений полезных ископаемых / Под ред. Г.А. Голодковской. М.: Изд-во МГУ, 1975. 180 с.
- 3. Гидрогеологические исследования в горном деле / В.А. Мироненко, Ю.А. Норватов, Л.И. Сердюков и др. М.: Недра, 1976. 352 с.
- 4. Глушко В.Т., Борисенко В.Г. Инженерно-геологические особенности железорудных месторождений. М.: Недра, 1978. 253 с.
- 5. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: Учебник для вузов. Л.: Недра, 1986. 272 с.
- 6. Даммер А.Э., Квашук С.В. Инженерно-геологические условия южной части Хабаровского края. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2001. 122 с.
- 7. Абатурова И.В. Оценка и прогноз инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых горно-складчатых областей. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. 226 с.
  - 8. Грязнов О.Н. Инженерно-геологические условия Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2017. 240 с.
- 9. Фоменко И.К., Калинин Э.В., Панасьян Л.Л. Оценка полей напряжений в окрестностях Кольской сверхглубокой скважины // В сб. статей «Результаты изучения глубинного вещества и физических процессов в разрезе Кольской сверхглубокой скважины до глубины. Апатиты: КНЦ РАН, 2000. С. 165–167.
- 10. Калинин Э.В., Панасьян Л.Л. Опыт применения геомоделей для изучения напряженнодеформированного состояния массива горных пород методом математического моделирования // Геоэкология. 2015. № 6. С. 483–498.
- 11. Фролова Ю.В. Современные подходы к изучению скальных грунтов и их массивов (обзор по материалам XII Конгресса МАИГ-2014) // Геоэкология. 2015. № 6. С. 553–560.
- 12. Рященко Т.Г., Тирских С.А., Корнилова Т.А., Брыжак Е.В. Комплексная инженерно-геологическая оценка протерозойских песчаников (строительная площадка в районе Удокана) // Известия вузов. Геология и разведка. 2015. № 3. С. 51–58.
- 13. Рященко Т.Г., Маслов Е.А. Опыт инженерно-геологической оценки скальных грунтов (Албазинское месторождение на севере Хабаровского края) // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии. Труды Международной научной конференции. М.: МГУ, 2021. С. 268–272.

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОДОПОНИЖАЮЩЕЙ ШТОЛЬНИ ЛАГЕРНОГО САДА (г. ТОМСК)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-543-546

Сотникова Е.Е. $^{1}$ , Дутова Е.М. $^{1,2}$ , Кузеванов К.И. $^{1}$ , Щербак Н.Г. $^{3}$ 

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, belozertseva1994@mail.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, <sup>3</sup>ООО «НПФ «Геостройпроект», Томск

Аннотация. В работе рассмотрено водопонижающее действие дренажной горной выработки Лагерного сада г. Томска. Представлены результаты замеров дебита штольни по трем участкам (штольня № 1 (западное крыло), штольня № 1 (восточное крыло) и штольня № 2) в зависимости от вида водозаборного устройства (сквозные фильтры, восстающие скважины, трещины, свищи и заливочные трубы). Общий дебит дренажного гидротехнического сооружения составляет примерно 25.7 л/с. Этого достаточно для предотвращения развития оползневых процессов на данной территории.

Ключевые слова: штольня, дебит, водовыпуск, мониторинг.

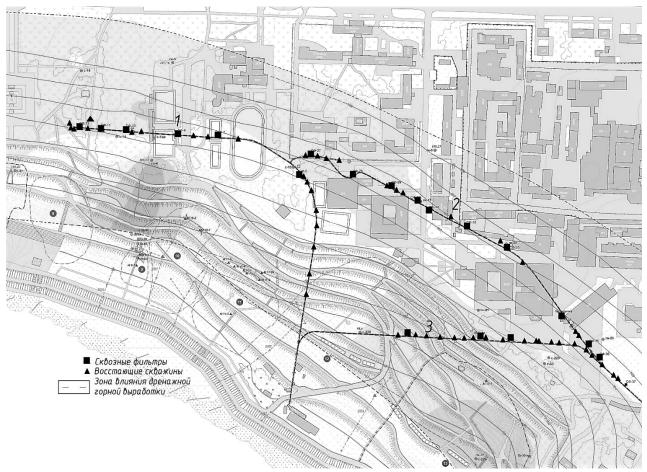
**Abstract.**The paper considers the draining effect of the drainage mine workings of the Camp Garden in Tomsk. The results of the flow rate of the adit along three branches (adit  $N_2$  1 (west wing), adit  $N_2$  1 (east wing), and adit  $N_2$  2) are presented, depending on the type of water outlet (through filters, rising wells, cracks, fistulas, and fill pipes). The total flow rate of the drainage hydraulic structure is approximately 25.7 l/s. This is enough to prevent the development of landslide processes in this area.

Key words: adit, flow rate, water outlet, monitoring.

Территория г. Томска характеризуется сложными гидрогеологическими условиями. Современное техногенное воздействие сказывается на равновесии водного баланса территории и зачастую приводит к развитию процессов подтопления. Особенности гидрогеологических условий городской территории проявляются в наличии многочисленных точек разгрузки подземных вод, что в совокупности с двухъярусным геологическим строением разреза приводит к развитию опасных оползневых процессов [1]. Одним из таких участков является склон Лагерного сада г. Томска, расположенный в южной части города. Для стабилизации склона был разработан комплекс противооползневых мероприятий, в состав которого входит горизонтальная дренажная горная выработка. Необходимость ее строительства возникла вследствие активизации геологических процессов в период массовой застройки территории в конце XX в. решению этой проблемы были привлечены сотрудники кафедры гидрогеологии и инженерной геологии ТПУ. В кратчайшие сроки было разработано обоснование схемы размещения системы подземного дренажа Ю.В. Макушиным и К.И. Кузевановым и проведены прогнозные расчеты, доказывающие ее эффективность [2]. Дренажная штольня вошла в состав других противооползневых мероприятий, включающих выполаживание и террасирование склона, высадку растительности, устройство поверхностного дренажа для отвода дождевых и талых вод.

Трасса дренажной горной выработки (ДГВ) в проекции на поверхность простирается от мемориала воинам-томичам до ул. 19-й Гвардейской дивизии. ДГВ разделяется на три участка: штольня № 1, западное крыло (протяженность 830 м), штольня № 1, восточное крыло (протяженность 596 м) и штольня № 2 (протяженность 1300 м). Участок штольни № 2 от ПК-53 (530 м от сопряжения со штольней № 1) находится в аварийном состоянии и не является объектом исследований (рисунок).

Строительство дренажной горной выработки началось в 1993 г. В настоящее время, несмотря на то, что оно не завершено, отмечается существенное осушающее влияние на оползневой склон.



Расположение штольни Лагерного сада (1 – штольня № 1 (западное крыло); 2 – штольня № 1 (восточное крыло); 3 – штольня № 2).

Проектом дренажной штольни предусмотрена ее проходка в верхней части коры выветривания палеозойских пород, которая является водоупорной подошвой верхней обводненной рыхлой толщи. Дренаж подземных вод обеспечивают сквозные фильтры, пройденные с поверхности и соединенные с внутренним пространством штольни. Дополнительно к этому в кровле подземной горной выработки пробурены восстающие вертикальные скважины малого диаметра. Весь приток дренажных вод поступает в лоток на дне штольни и отводится за пределы оползневого склона Лагерного сада самотеком без применения насосного оборудования. Скважины под сквозные фильтры конечным диаметром 300 мм проходились на удалении не более 5 м от оси штольни, а затем соединялись с ней специальными приемными камерами.

Мониторингом склона Лагерного сада длительно занималась Лагерносадская партия (оползневая станция) Томской комплексной геологоразведочной экспедиции [3], а позднее Томскгеомониторинг [4–6]. В настоящее время к проведению режимных наблюдений активно привлекаются сотрудники ТПУ, ТГУ, а также НПФ «Геостройпроект». В состав работ, кроме регулярных замеров дебита, входит определение спектра основных показателей химического состава подземных вод, изучение агрессивности гидрогеохимических сред и минералообразующей способности подземных вод [7–17]. В данной работе отражены результаты наблюдений за расходом дренажных вод на участке защиты склона Лагерного сада.

На современном этапе дренажная горная выработка справляется со своей функцией, она перехватывает фильтрационный поток в глубине геологического разреза и отводит подземные воды в р. Томь за пределами оползневого склона. Для отслеживания этого процесса в дренажной штольне проводится регулярный мониторинг на участках разгрузки подземных вод, в состав которых входят восстающие скважины, сквозные фильтры,

трещины и свищи, образовавшиеся в результате коррозии тела дренажной горной выработки. Данные приведены за 2020 г.

Дебит восточного участка штольни № 1 (восточное крыло) составляет в среднем 3.5 л/с, из них примерно 94.5 % приходится на сквозные фильтры (2.7 л/с), 3.5 % — на восстающие скважины (0.1 л/с), 2 % — на трещины, свищи, заливочные трубы (0.06 л/с).

На западном участке штольни № 1 (западное крыло) расход дренажных вод в среднем составляет 1.4 л/с, из которых сквозными фильтрами отводится 74.8 % воды (0.9 л/с), восстающими скважинами -3.5 % (0.04 л/с), трещинами, свищами и заливочными трубами -21.7 % воды (0.3 л/с).

Штольней № 2 дренируется наибольшее количество подземной воды, что связано с ее значительной протяженностью (1300 м), аварийным состоянием (начиная с ПК 53+00) и большим количеством утечек из трещин и свищей. Общий дебит штольни № 2 за 2020 г. составил 19.6 л/с, из них 17.3 л/с приходится на аварийную часть крепления горной выработки, где классифицировать водопритоки по отношению к виду водоприемных устройств затруднительно. На долю сквозных фильтров приходится 18.8 % от дебита штольни № 2 (4 л/с), на восстающие скважины — 0.5 % (0.1 л/с) и на трещины, свищи и заливочные трубы также 0.5 % (0.1 л/с).

Общий дебит штольни Лагерного сада в среднем оценивается величиной 24.4 л/с (таблица).

Дебит дренажной горной выработки по участкам

№ п/п	Дата замера	Штольня № 1 западное крыло	Штольня № 1 восточное крыло	Штольня № 2	ДГВ
312 11/11	дата замера	Дебит, л/с	Дебит, л/с	Дебит, л/с	Дебит, л/с
1	15.04.20	1.283	2.787	21.385	25.455
2	25.04.20	1.300	2.767	20.947	25.014
3	16.05.20	1.311	2.766	19.314	23.391
4	27.05.20	1.323	2.880	19.819	24.022
5	06.06.19	1.295	2.891	21.375	25.561
6	20.06.20	1.258	2.853	21.570	25.681
7	30.07.20	1.357	2.890	20.041	24.288
8	22.08.20	1.390	3.155	19.181	23.726
9	12.09.20	1.423	4.569	18.525	24.517
10	26.09.20	1.432	5.180	18.123	24.735
11	14.10.20	1.563	3.904	18.363	23.830
12	31.10.20	1.577	3.902	18.195	23.674
13	21.11.20	1.565	3.973	18.390	23.928
14	12.12.20	1.547	4.044	18.662	24.253

На основании данных по дебиту дренажных вод за 2020 г. можно сделать вывод о том, что сквозные фильтры в совокупности с восстающими скважинами находятся в рабочем состоянии и обеспечивают достаточную степень осушения палеоген-четвертичного водоносного горизонта по трассе штольни для стабилизации оползневого склона. Конструктивное решение, принятое на этапе проектирования дренажной системы как компромисс между минимальным заглублением штольни в толщу водонепроницаемых глин коры выветривания и сохранением искусственного уклона по направлению к руслу р. Томи, можно признать удачным. Это доказывается эффективным отводом подземных вод за пределы оползневого склона в течение длительного времени без применения насосного оборудования.

## Список литературы

- 1. Ольховатенко В.Е. Опасные природные и техногенные процессы на территории г. Томска и их влияние на устойчивость природно-технических систем. Томск, 2005. 141 с.
- 2. Макушин Ю.В., Кузеванов К.И. Гидрогеологическое обоснование горизонтального дренажа оползневого склона // Межвузов. сб. научн. тр. Тюмень: ТИИ, 1991. С. 28–34.
- 3. Иванчура А.Л. Отчет Лагерносадской партии (оползневой станции) по результатам работ 1983-86 гг., Томск: Томская ГРЭ 1987. 182 с. № 35832/55. Инв. № 757/1
  - 4. AO «Томскгеомониторинг». [Электронный ресурс]. URL: http://www.tgm.ru, свободный.
- 5. Информационный бюллетень о выполненных работах по оказанию услуг по мониторингу оползневого склона Лагерного сада в 2016 г. Томск, 2017.
- 6. Покровский Д.С., Кузеванов К.И. Гидрогеология и подтопление территории г. Томска // Подземные воды юга Западной Сибири. Формирование и проблемы рационального использования: Сб. научн. тр. / Отв. ред. В.А. Николаев. Новосибирск: Наука, 1987. Вып. 683. С. 146–153.
- 7. Покровский Д.С., Кузеванов К.И. Типовые фильтрационные разрезы как основа геоэкологического картирования урбанизированных территорий // Геоэкологическое картирование: Тез. докл. всерос. конф. М., 1998. С. 60–63.
- 8. Покровский Д.С., Кузеванов К.И. Гидрогеологические проблемы строительного освоения территории г. Томска // Обской вестник. 1999. № 1–2. С. 96–101.
- 9. Кузеванов К.И. Гидрогеологическая основа экологических исследований города Томска. // Обской вестник. 1999. № 1–2. С. 53–58.
- 10. Покровский В.Д., Дутова Е.М., Кузеванов К.И., Покровский Д.С. Информационно-поисковая система оценки степени подтопляемости территории города Томска // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 1 (48). С. 172–181.
- 11. Pokrovsky V.D., Dutova E.M., Kuzevanov K.I., Pokrovsky D.S., Nalivaiko N.G. Hydrogeological Conditions Changes of Tomsk, Russia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2015. V. 27: Problems of Geology and Subsurface Development. [012031, 6 p.].
- 12. Pokrovsky V., Pokrovsky D., Dutova E., Nikitenkov A., Nazarov A. Degree of Areal Drainage Assessment Using Digital Elevation Models // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 21 012018 doi:10.1088/1755-1315/21/1/012018. 2014.V. 21.
- 13. Кузеванов К. И., Дутова Е. М., Покровский Д. С. Использование геоинформационных технологий при исследовании процессов техногенного подтопления урбанизированных территорий (на примере г. Томска) [Электронный ресурс] // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307, № 7. С. 30–35.
- 14. Покровский В.Д., Дутова Е.М., Никитенков А.Н., Кузеванов К.И., Покровский Д.С. Методические подходы к оценке степени дренированности урбанизированных территорий // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–2. 4 с.
- 15. Dutova E., Vologdina I., Pokrovsky D., Nalivaiko N., Kuzevanov K., Pokrovsky V. Hydrogenous mineral neoformations in Tomsk water intake facility from underground sources [Electronic resource] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 33: Contemporary Issues of Hydrogeology, Engineering Geology and Hydrogeoecology in Eurasia. [012017, 6 p.].
- 16. Karmalov A.I., Dutova E.M., Vologdina I.V., Pokrovsky D.S., Pokrovskiy V.D., Kuzevanov K.K. Hydrogeochemical characteristics of water intakes from groundwater sources in Seversk [Electronic resource] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 43: Problems of Geology and Subsurface Development. [012032, 6 p.].

# АНАЛИЗ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОРОДНОГО МАССИВА НА УЧЕБНОМ ПОЛИГОНЕ УРАЛЬСКОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-547-551

Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Болотнова Л.А., Сурганов С.В. Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, tagiltsev@k66.ru

Аннотация. Учебный полигон горного университета много лет используется для проведения гидрогеологической и геофизической практики. Хорошая изученность геологической среды позволяет длительно исследовать гидрогеологическую структуру породного массива с применением различных методик. Разломная тектоника оказывает очень большое влияние на гидрогеодинамическую структуру трещинного приповерхностного водоносного горизонта. В поле современных тектонических напряжений при пересечении разнонаправленных разломов и разломов различного кинематического типа возникают зоны растяжения и сжатия, которые отличаются высокой контрастностью по фильтрационным и плотностным свойствам. Применение метода гравиразведки на участках скальных массивов с известной тектонической структурой показало высокую эффективность детализации узлов тектонических нарушений по фильтрационным свойствам.

**Ключевые слова:** тектонические напряжения, гидрогеомеханические структуры, зоны растяжения и сжатия, плотность горных пород, гравиразведка, фильтрационные свойства.

**Abstract.** The training ground of the Mining University has been used for hydrogeological and geophysical practice for many years. A good knowledge of the geological environment allows us to study the hydrogeological structure of the rock mass for a long time using various methods. Fault tectonics has a very large influence on the hydrogeodynamic structure of the fractured near-surface aquifer. In the field of modern tectonic stresses, at the intersection of multidirectional faults and faults of various kinematic types, zones of tension and compression arise, which are characterized by high contrast in filtration and density properties. The use of the method of gravity exploration in areas of rock massifs with a known tectonic structure has shown a high efficiency of detailing the nodes of tectonic disturbances by filtration properties.

**Keywords:** tectonic stresses, hydrogeomechanical structures, zones of tension and compression, rock density, gravity exploration, filtration properties.

Учебная база Уральского государственного горного университета (УГГУ) много лет используется для проведения гидрогеологической, геофизической и буровой практики студентов факультета геологии и геофизики. Самую длительную учебную практику (восемь недель) проходят студенты специализации «Поиски и разведка подземных вод и инженерногеологические изыскания». Полевая учебная практика позволяет получить и закрепить практические навыки основных видов гидрогеологических, инженерно-геологических, геофизических и буровых методов полевых исследований.

База УГГУ располагается в пос. Верх-Сысерть, в 50 км от г. Екатеринбурга. Геологическое строение полигона изучено с достаточной достоверностью для проведения учебных занятий. Основную часть полигона слагают древние протерозойские гнейсы, по составу близкие к гранитам. В гнейсах отсутствует анизотропия физических свойств и признаки слоистости. В процессе выполнения гидрогеологических и геофизических работ стало выявляться сложное тектоническое строение территории полигона. Сдвиги правой кинематики имеют преобладающее простирание 210–220°, а сдвиги левой кинематики — 320–335°. Сбросы имеют субширотное простирание и крутое падение (примерно 60°). Взбросы (надвиги) отличаются субмеридиональным простиранием и средним углом падения около 45–55°. Разломная тектоника оказывает очень большое влияние на гидрогеодинамическую структуру трещинного приповерхностного водоносного горизонта. Фильтрационные свойства соседних участков породного массива нередко отличаются более чем на порядок. Для углубления представлений о структуре водоносного горизонта временные научные коллективы студентов и преподавателей различных специальностей ставят и решают конкретные исследовательские задачи.

В последние годы при проведении учебной практики особое внимание уделяется изучению закономерностей формирования в породах одинакового литологического состава аномальных участков с очень высокими фильтрационными свойствами. Теоретическое обоснование этих процессов рассматривается в научном направлении «гидрогеомеханика»

[1, 2]. В основе этого научного направления лежат представления о том, что под воздействием геомеханических процессов, протекающих в поле тектонических напряжений земной коры, геологические тела приобретают особые гидрогеологические или инженерногеологические свойства. Эти геологические тела следует рассматривать гидрогеомеханические структуры [1, 2]. Для выявления анализа свойств И гидрогеомеханических структур необходимо знать закономерности развития напряженнодеформированного состояния геологической среды.

В настоящее время признается [3, 4], что напряженное состояние верхней части земной коры проявляется наличием главных нормальных напряжений, которые, как правило, превышают геостатические напряжения от веса горных пород. Главное максимальное напряжение (ГМН) в верхней части земной коры имеет субгоризонтальную ориентировку [5, 6]. Вектор, отражающий направление действия главного максимального напряжения в горизонтальной плоскости, не сохраняет однозначной ориентации. Исследования, выполненные на ряде объектов, показали, что ориентировка ГМН обычно варьируется между относительно устойчивыми, определенными направлениями. В пределах Уральского региона вектор ГМН ориентирован чаще всего по двум направлениям со средними азимутами 260 и 285° [6].

В земной коре под воздействием тектонических напряжений образуются структуры разрушения (разломы), которые нарушают сплошность породных массивов и формируют блочную среду в геологическом пространстве. При вариациях поля напряжений тектонические нарушения могут изменять свой кинематический тип и, как правило, совершают довольно сложные, нередко разнонаправленные, возвратно-поступательные движения [6]. Учитывая данное обстоятельство, в конкретных ситуациях в большинстве случаев следует опираться на базовое представление, что разлом образуется и активизируется под воздействием одного главного (коренного) вектора ГМН и соответствующего поля напряжений.

Тектонические границы разлома (швы, края, берега) при силовом воздействии поля напряжений совершают преобладающие движения в определенном направлении. При этом берега одного и того же конкретного разлома движутся в противоположных направлениях. При пересечении разломов происходит их силовое взаимодействие. В зависимости от направления движения берегов взаимодействующих разломов возникают зоны сжатия и растяжения. Следует учитывать, что собственно тело разлома, которое находится между краевыми швами (берегами) разлома, бывает глубоко проработано деформационными процессами и не имеет признаков растяжения и сжатия. С позиции гидрогеологии наиболее водоносными участками являются зоны растяжения, которые способствуют формированию высоких фильтрационных свойств на локальном участке массива горных пород [2]. Возникновение зон растяжения и сжатия как наиболее типичный случай представляет пересечение двух сдвиговых структур.

Как правило, сдвиги, активные в современном поле напряжений, пересекаются под углом, близким к прямому. При силовом взаимодействии разломов и разнонаправленных движениях по швам тектонических нарушений в двух секторах (северном и южном) образуются зоны растяжения, а в двух других секторах (западном и восточном) — зоны сжатия [2]. Формирование зон сжатия и растяжения определяется направлением движения по разлому. Когда движения по разным разломам как бы сходятся — возникает зона сжатия, когда векторы движений расходятся — возникают зоны растяжения. На Урале в случае пересечения сдвигов зоны растяжения возникают обычно в северном и южном секторе, а зоны сжатия, соответственно, в западном и восточном.

В верхней части земной коры, помимо разломов, которые относятся по кинематическому типу к сдвигам, формируются также надвиги (взбросы) и сбросы. В приповерхностной части геологического разреза имеют широкое развитие надвиги (взбросы). При пересечении со сдвигами движение по одному из бортов сдвига совпадает с направлением движения надвига [2, 7]. По этому борту не всегда реализуются условия для

формирования зон сжатия и растяжения (рис. 1). По другому шву сдвигового разлома формируется зона растяжения и сжатия. Зона растяжения возникает на участке между разломами, который ограничен острым углом. На другом участке взаимодействия разломов, который возникает между висячим швом надвига и сдвигом, формируется зона сжатия [2].

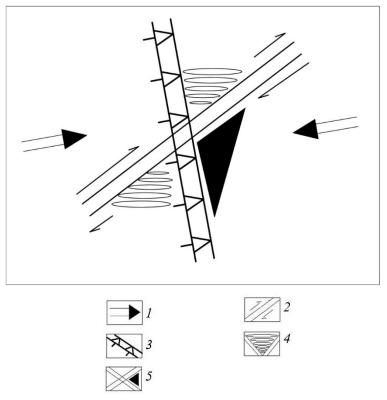


Рис. 1. Зоны растяжения и сжатия при пересечении надвига и сдвига. 1 — направление действия главного максимального напряжения; 2 — сдвиг; 3 — надвиг; 4 — зона растяжения; 5 — зона сжатия.

Зона растяжения имеет относительно небольшие размеры, но может быть очень контрастной по степени разуплотнения пород. При поисках подземных вод следует ориентироваться на висячий бок надвига, образующего со сдвигом острый угол. Угол падения надвигов (взбросов) варьируется в широких пределах, и поэтому в зоне взаимодействия указанных разломов могут отсутствовать хорошо выраженные зоны растяжения и сжатия. Очень часто взбросы (надвиги) играют в формировании гидрогеомеханических структур пассивную роль, выступая в качестве деформационного шва, локально усиливающего процессы растяжения при взаимодействии других разломов.

При выборе мест заложения гидрогеологических скважин в узлах разломов требуется высокая точность. Необходимо, чтобы скважина попала в локальную зону растяжения, которая нередко имеет относительно небольшие размеры (несколько метров). Для высокоточной детализации строения узлов пересечения разломов следует применять геофизические методы [8, 9].

В массивах горных пород зоны растяжения и сжатия потенциально являются контрастными для большинства геофизических методов. Основные методы геофизики различаются по степени трудоемкости, уровню возможной детализации результатов исследований и частоте применяемости в гидрогеологических работах. Если опираться на физическое содержание процессов растяжения и сжатия, то следует предполагать, что эти зоны (сжатия и растяжения) должны существенно различаться по плотности. С указанных позиций обращает на себя внимание гравиразведка. Зоны растяжения и сжатия должны быть контрастными в поле силы тяжести. Метод относительно нетрудоемкий, результаты

исследований наглядно интерпретируются. Следует отметить, что гравиразведка очень редко применяется при гидрогеологических работах.

В пределах полигона Уральского горного университета был выбран участок, тектоническое строение которого полностью соответствует гидрогеомеханической схеме, представленной на рисунке 1. Массив горных пород слагают относительно однородные гнейсы допалеозойского возраста. На данном участке располагается гидрогеологическая скважина, которая вскрыла интервал геологического разреза с очень высокими, для этих пород, фильтрационными свойствами. Водопроводимость горизонта, определяемая при откачках из этой скважины, составляет 400 м²/сут. Скважина располагается вне зон разломов, представленных на (рис. 1, 2). Можно предполагать, что скважина вскрыла зону растяжения, возникшую при силовом взаимодействии взброса и сдвига.

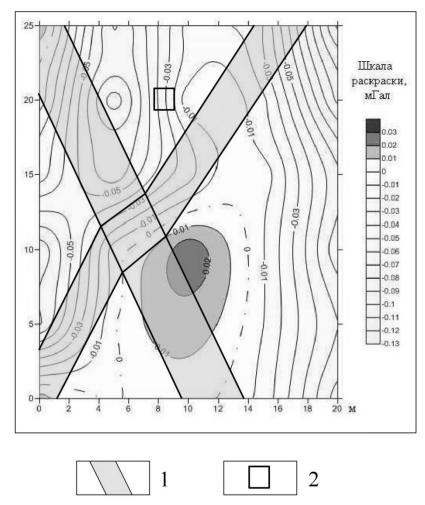


Рис. 2. Совмещение плана излома силы тяжести и зон разломов. 1 — зоны разломов; 2 — гидрогеологическая скважина.

На относительно небольшой территории (20 на 25 м) была выполнена в площадном варианте гравиметрическая съемка по сети наблюдений 5 на 5 м. Объем работ составил 30 точек физических наблюдений [9]. По результатам съемки был построен план изоаномал относительных наблюденных значений силы тяжести ( $\Delta g_{\rm H}$ ). Гравитационное поле, представленное на рисунке 2, имеет как положительные, так и отрицательные значения. В южной части наблюдается область положительных значений гравитационного поля почти изометричной формы, которая обусловлена наличием более плотных пород. Следует полагать, что таким образом в гравитационном поле выделяется зона сжатия.

В северо-западной части участка выделяется зона отрицательных аномалий силы тяжести, которую можно рассматривать как зону растяжения. Восточная часть эоны

растяжения вскрыта гидрогеологической скважиной, которая характеризуется аномально высокими значениями фильтрационных свойств горных пород. В центральной части карты наблюдается осложнение гравитационного поля в виде характерного изгиба изоаномал. Искажение поля тяжести, вероятно, связано с местом пересечения разломов.

Для анализа полученных результатов выполнено совмещение плана, отражающего положение разломов на изучаемом участке, и плана изоаномал силы тяжести (рис. 2). Положительная аномалия силы тяжести совпадает с предполагаемой зоной сжатия, а отрицательная аномалия – с зоной растяжения. Очень важно отметить, что центры аномалий как бы находятся под передовым швом взброса. Данная особенность определяется тем, что зоны сжатия и растяжения формируются на некоторой глубине, а взброс имеет определенный угол наклона, поэтому аномальные участки частично перекрываются разломной зоной. Эту особенность следует учитывать при выборе точек заложения гидрогеологических скважин.

В поле современных тектонических напряжений при пересечении разнонаправленных разломов и разломов различного кинематического типа возникают зоны растяжения и сжатия. Зоны растяжения формируют локальные участки с высокими фильтрационными свойствами, а процессы локального относительного сжатия определяют возникновение относительно водоупорных участков в массивах горных пород. Тектоническую структуру участка геологической среды, на котором предполагается выполнять поиски и разведку подземных вод, следует детализировать с применением гидрогеомеханических и эффективных геофизических методов.

## Список литературы

- 1. Тагильцев С.Н. Использование тектонофизического анализа для оценки гидрогеологической роли разломов // Тектонофизические аспекты разломообразования в литосфере: Тез. докл. Всесоюз. совещания. Иркутск, 1990. С. 169–170.
- 2. Тагильцев С.Н., Кибанова Т.Н. Гидрогеомеханические структуры растяжения и сжатия в поле современных тектонических напряжений // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. № 7. С. 63–69.
  - 3. Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 302 с.
  - 4. Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику. М.: КДУ, 2005. 496 с.
- 5. Шерман С.И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 158 с.
- 6. Тагильцев С.Н. Закономерности пространственного расположения тектонических нарушений в поле современного напряженного состояния земной коры // Горный журнал. Изв. вузов. 2018. № 7. С. 52–66.
- 7. Тагильцев С.Н., Осипова А.Ю., Лукьянов А.Е. Активные тектонические структуры и их выявление на строительных площадках // Уральский строитель. 2012. № 11–12. С. 31–33.
- 8. Тагильцев С.Н., Чередниченко А.В., Мельник В.В. Комплексирование методов гидрогеомеханики, электроразведки и биолокации для выбора мест заложения гидрогеологических скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3-1. С. 236—246. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-236-246
- 9. Тагильцев С.Н., Болотнова Л.А., Тагильцев В.С. Детализация тектонических структур растяжения и сжатия по данным гравиразведки // 14-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная геофизика 2018» Алматы, Казахстан, 23–28 апреля 2018 г. DOI: 10.3997/2214-4609.201800536.

# КАЧЕСТВО ПРИРОДНЫХ ВОД СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ ГОРОДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-552-556

Черных А.В. <sup>1</sup>, Новиков Д.А. <sup>1</sup>, Дульцев Ф.Ф. <sup>1</sup>, Хващевская А.А. <sup>2</sup>, Ничкова Л.А. <sup>3</sup>, Сигора Г.А. <sup>3</sup>, Хоменко Т.Ю. <sup>3</sup>, Яхин Т.А. <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, garibova@yandex.ru

<sup>3</sup>Севастопольский государственный университет, Севастополь, nichkovalara@gmail.com <sup>4</sup>Государственное унитарное предприятие города Севастополя «Водоканал», Севастополь, timalife@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты оценки качества природных вод Севастопольской городской агломерации. Были изучены подземные воды централизованных и нецентрализованных источников водоснабжения населения (водозаборов, родников и колодцев, водохранилища, озерных и речных вод). На основании действующих в России нормативных документов и рекомендаций Всемирной организации по здравоохранению (WHO) установлено, что воды лишь 32 % изученных объектов соответствуют действующим регламентам. Засуха последних двух лет усугубила негативные тенденции. Воды Чернореченского водохранилища могут рассматриваться как соответствующие высшей категории качества питьевых вод, а Родниковского водозабора — первой. Превышения ПДК по 23 показателям выявлены в водах Орловского водозабора, родника на ул. Громова и скважины в с. Колхозное.

Abstract. The paper presents the results of assessing the quality of natural waters of the Sevastopol urban agglomeration. Ground waters of centralized and non-centralized sources of water supply for the population (water intakes, springs and wells, reservoirs, lake and river waters) were studied. According to the requirements of the World Health Organization (WHO), it has been established that only 32% of the studied objects are subject to current regulations. The drought of the past two years has exacerbated negative trends. The waters of the Chernorechensky reservoir can be considered as corresponding to the highest category of drinking water quality, and the Rodnikovsky water intake - the first. Exceeding the LOC was revealed for 23 indicators, with the greatest discrepancy in the waters of the Orlovsky water intake, a spring on the Gromov street and wells in the Kolkhoznoye village.

*Key words:* hydrogeochemistry, drinking water supply of the population, quality of natural waters, LOC, Crimea peninsula.

В последние годы проблема чистой питьевой воды на нашей планете приобретает все большее значение. Растущая антропогенная нагрузка оказывает огромное влияние на экологическое состояние водных экосистем. В настоящее время в пределах Севастопольской городской агломерации (СГА) не разработана система контроля состояния, использования и обеспечения сохранности пресноводных ресурсов. Одним из важнейших ресурсов для успешного развития любого региона являются природные воды, используемые в питьевых целях. В настоящее время в различных гидрогеологических условиях в малых населенных пунктах эксплуатируется множество частных скважин и колодцев со слабоизученным химическим составом. В сложившейся ситуации возникает опасность использования населением в питьевых целях вод, не соответствующих современным требованиям качества, поэтому необходимо иметь полное и актуальное, основанное на современных методах опробования и исследования, представление об их составе.

В ходе экспедиционных работ, проведенных в период 2018–2020 гг., было отобрано 105 проб природных вод в пределах СГА (рис. 1). Отбор проб и предварительная пробоподготовка выполнялись в соответствии с общепринятыми методиками. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Оценка качества вод осуществлена с использованием нескольких взаимодополняющих друг друга методов; было выполнено их сравнение с действующими

нормативными документами СанПиН 2.1.4.1074-01 с изменениями на 2.04.2018, ГОСТ Р 51232-98, ГН 2.1.5.1315-0, а также рекомендациями Всемирной организации по здравоохранению (WHO 2017) [1–4]. Для оценки качества вод рассчитывался набор общепринятых в мировой практике параметров: PS — потенциальная соленость, SAR — коэффициент адсорбции натрия, SP — эквивалент-процентное содержание катионов натрия, RSC — остаток карбоната натрия, RSBC — остаток бикарбоната натрия, MAR — коэффициент адсорбции магния, KR — коэффициент Келли, PI — индекс водопроницаемости, CR — коэффициент коррозии и других [5–14].

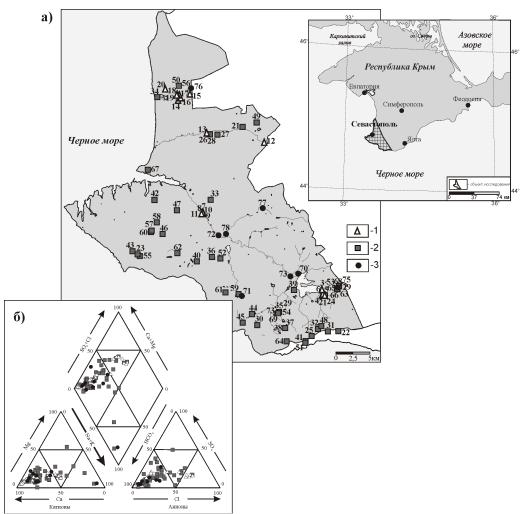


Рис. 1. Карта-схема отбора проб (a) и диаграмма Пайпера изученных вод (б). 1 – водозаборы (1–6 – Родниковский, 7–11 – Инкерманский, 12–13 – Бельбекский, 14–20 – Орловский); 2 – родники, источники, колодцы (номера 21–68); 3 – поверхностные воды (номера 69–78).

Изучались подземные воды водозаборов (Родниковский, Орловский, Бельбекский и Инкермаский), родников и колодцев и поверхностные воды (рек, водохранилищ, озер). Воды Родниковского водозабора — гидрокарбонатные кальциевые с величиной общей минерализации от 359 до 606 мг/дм<sup>3</sup>; Инкерманского водозабора — также гидрокарбонатного кальциевого состава с немного большей величиной общей минерализации — от 485 до 624 мг/дм<sup>3</sup>; Бельбекский водозабор характеризуется гидрокарбонатными кальциевыми и гидрокарбонатно-хлоридными кальциево-натриевыми водами с величиной общей минерализации от 603 до 804 мг/дм<sup>3</sup>. Наиболее минерализованы (от 947 до 1213 мг/дм<sup>3</sup>) подземные воды Орловского водозабора, среди которых установлено преобладание хлоридно-гидрокарбонатного кальциево-натриевого типа. Вторая группа является наиболее разнообразной по химическому составу. Выявлено 13 химических типов от сульфатно-

гидрокарбонатно-хлоридного кальциево-магниевого до хлоридного кальциево-натриевого, при доминировании гидрокарбонатного кальциевого типа. Величина общей минерализации варьируется в широких пределах — от 253 до 2083 мг/дм³ (среднее 723 мг/дм³). Наиболее минерализованные воды (более 1 г/дм³) установлены в с. Колхозное, в колодце возле храма Воскресения Христова и в роднике на ул. Громова (северная сторона г. Севастополя). Среди поверхностных вод (третья группа) широко распространены гидрокарбонатные кальциевые воды, меньшим распространением пользуются гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-хлоридные кальциево-натриевые и гидрокарбонатные натриевые воды. Их минерализация варьируется в небольших пределах — от 217 до 528 мг/дм³ (среднее 345 мг/дм³).

Оценка качества природных вод СГА была выполнена по 53 показателям, из которых по 30 не выявлено превышения предельно допустимых концентраций (ПДК), остальные показатели приведены в таблице. Следует отметить, что для каждой пробы было изучено более 90 параметров, и по 40 из них еще не разработаны ПДК для питьевых вод. Установлено, что содержания основных макро- и микрокомпонентов в подземных водах 25 объектов (из 78) не превышают ПДК.

Водопункты с превышением ПДК

Водопункты с превыц	пением ПДК					
Показатели и	Действующий	Единицы	Номер водопункта			
компоненты	ПДК в России	измерения	помер водопункта			
Общая	1000	*	15 20 62 69			
минерализация	1000		15–20,63–68			
SO <sub>4</sub>	500	*	68			
C1	350	*	11,17,18–20,40,43,67,71,74			
Mg	50	*	64,67,68			
Na	200	*	67			
Общая жесткость	7.0	мг-экв/дм <sup>3</sup>	6,13,14-20,32,36,37,40-44,46-48,50-68			
NH <sub>4</sub>	1.5	*	77			
$NO_2$	3.3	*	45,68			
NO <sub>3</sub>	45	*	15,42,46,47,55–58,60,61,63,65–68			
Фосфаты	3.5	*	77			
F	0.7	*	21,49,53,67			
I	0.125	*	17,34,43,44,48			
Br	0.2	*	13,15–20,34,49,50,56,63,64,67,68			
Окисляемость	5.0	*				
перманганатная			25,45,53,66,71			
Li	0.03	*	64–66,68			
В	0.5	*	68			
Al	0.2	*	53,68			
Si	10.0	*	33,62			
Mn	0.1	*	25,41,48,66,68,73			
Fe	0.3	*	3,16,34,34,41,44,48,51,53,64,65,68			
Со	0.1	*	66			
Ni	0.02	*	52			
T1	0.0001	*	65			
L			,			

Примечание. Номер водопункта совпадает с номером на рис. 1; \* – мг/дм<sup>3</sup>.

Среди проб воды первой группы (водозаборы) из скважин Родниковского водозабора установлено превышение ПДК в скв. 5775 (по железу) и скв. 5776 (по общей жесткости). В одной скважине Инкерманского водозабора выявлено превышение по хлоридам, а в скважине Бельбекского – по общей жесткости и брому. Отдельно стоит отметить Орловский водозабор (рис. 2): во всех скважинах обнаружено превышение ПДК по общей жесткости,

общей минерализации, брому и хлоридам. Ранее нами отмечалось, что ошибки при его эксплуатации в 1980-х гг. привели к серьезным изменениям в химическом составе вод [15].

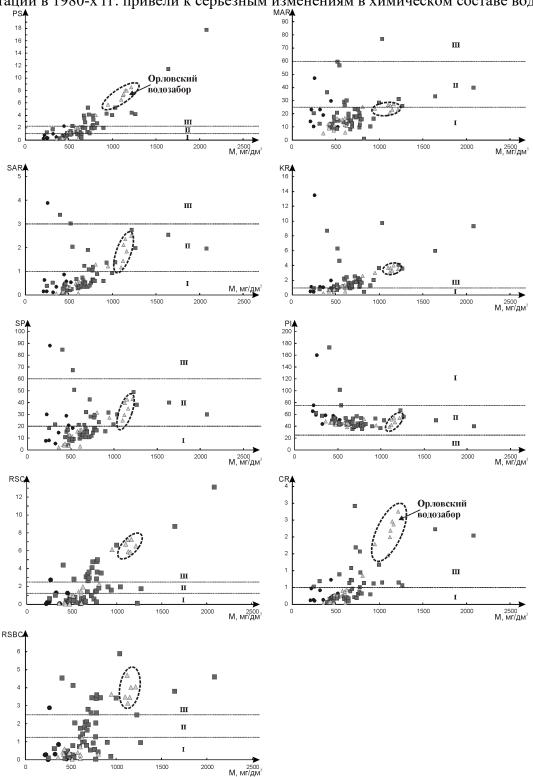


Рис. 2. Критерии качества подземных вод СГА. I — зона вод наивысшего качества, II — удовлетворительного качества, III — низкого качества. Остальные условные обозначения см. на рис. 1.

Во второй группе (родники, колодцы и источники) 12 объектов из 49, или 24.4 % можно отнести к соответствующим по качеству для питьевого водоснабжения. Основные превышения среди изученных проб установлены по общей жесткости и содержанию нитратов, железа, брома. Наиболее неблагоприятная обстановка выявлена при анализе

источников воды в с. Колхозное, родника на улице Громова (северная сторона г. Севастополя) и колодца возле храма Воскресения Христова, где превышение ПДК выявлено по величине общей минерализации, концентрациям магния, натрия, лития и других элементов. В третьей группе (поверхностные воды) установлены единичные превышения: по хлоридам и перманганатной окисляемости — в озере с. Гончарное, по хлоридам — в оз. Конюшня с. Орлиное, по аммонию и фосфатам — в р. Ай-Тодорка рядом с с. Терновка и по марганцу — в р. Черная в Байдарской долине (таблица).

В результате комплексного анализа качества вод для целей питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения установлено, что подземные воды Родниковского водозабора, р. Черная, Чернореченского водохранилища, а также ряда родников и колодцев (Кильсе-Бурунум, Горный ключ, Николаевский, Безымянный в с. Колхозное и др.) имеют наивысшее качество. Воды Орловского водозабора, родника на ул. Громова, скважины в с. Колхозное и серии родников в селах Пироговка, Орловка, Полюшко (рис. 2) практически по всем параметрам соответствуют водам низкого качества.

Исследование выполнено при поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025, РФФИ и города Севастополя в рамках гранта № 18-45-920032  $p_a$  и Государственного Задания РФ «Наука» в рамках проекта № FSWW-0022-2020.

## Список литературы

- 1. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. Утв. Гл. гос. санитарным врачом РФ 28 июня 2010 г. № 74 с изменениями на 2 апр. 2018 г. М. 2018. 125 с.
- 2. ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. М.: ФГУП "СТАНДАРТИНФОРМ", 2010. 18 с.
- 3. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Утв. Гл. гос. санитарным врачом РФ 30 апр. 2003 г. № 78. М. 2003. 94 с.
- 4. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization, 2007. 631 p.
- 5. Bashir E., Huda S.N., Naseem S., Hamza S., Kaleem M. Geochemistry and quality parameters of dug and tube well water of Khipro, District Sanghar, Sindh, Pakistan // Appl Water Sci. 2017. № 7. P. 1645–1655.
  - 6. Camberato J. Irrigation water quality. USA: Turfgrass Program, Clemson University, 2011. 10 p.
- 7. Bauder T.A., Waskom R.M., Sutherland P.L, Davis J.G Irrigation water quality criteria. USA: Colorado State University Extension Report, 2013. 306 p.
- 8. Ganiyu S.A., Badmus B.S., Olurin O.T., Ojekunle Z.O. Evaluation of seasonal variation of water quality using multivariate statistical analysis and irrigation parameter indices in Ajakanga area, Ibadan, Nigeria // Appl. Water Sci. 2018. № 8 (35). 15 p.
- 9. Gulgundi M.S., Shetty A. Groundwater quality assessment of urban Bengaluru using multivariate statistical techniques // Appl. Water Sci. 2018. No 8 (43). 15 p.
- 10. Kaur T., Bhardwaj R., Arora S. Assessment of groundwater quality for drinking and irrigation purposes using hydrochemical studies in Malwa region, southwestern part of Punjab, India // Appl. Water Sci. 2017. № 7. P. 3301–3316
- 11. Khan T.A., Abbasi M.A. Synthesis of parameters used to check the suitability of water for irrigation purposes // Int. J. Environ. Sci. 2013. № 3 (6). P. 2031–2038.
- 12. Park S., Yun S., Chae G., Yoo I., Shin K., Heo C., Lee S. Regional hydrochemical study on salinization of coastal aquifers, western coastal area of South Korea // J. Hydrol. 2005. № 313. P. 182–194.
- 13. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Оценка качества подземных вод верхнеюрских отложений юго-западных районов Крымского полуострова для целей питьевого и сельскохозяйственного водоснабжения // Экология и промышленность России. 2019. Т. 2, № 4. С. 52–57.
- 14. Хващевская А.А., Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Сметанина И.В., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф. Роль системы "вода порода" в процессах формирования состава природных вод Севастопольской городской агломерации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 1. С. 118–128.
- 15. Новиков Д.А., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Юрчик И.И., Сухорукова А.Ф. Особенности гидрогеохимии эксплуатируемых водоносных горизонтов Севастопольской городской агломерации // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Новосибирск, 2018. Т. 2. С. 84–91.

# ТЕХНОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД В РАЙОНАХ ПЕРЕРАБОТКИ РЬ-Zn РУД (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-557-561

#### Чечель Л.П.

Институт природных ресурсов, экологии и криологии CO PAH, Чита, lpchechel@mail.ru

Аннотация. Изучен химический состав вод, формирующихся в пределах хвостохранилищ трех свинцово-цинковых месторождений, расположенных в Восточном Забайкалье. Их особенностью является формирование в условиях сочетания в минеральном составе хвостов сульфидной и карбонатной минерализации. Исследованные воды пресные и солоноватые, нейтральные и слабощелочные, преимущественно HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> и SO<sub>4</sub> Mg-Ca. В микрокомпонентном составе вод преобладают As, Zn, Cd и Pb. Воды насыщенны относительно вторичных карбонатов и арсенатов, что свидетельствует о существовании термодинамических условий для выведения Ca, Mg, Cu, Zn, Pb и As в твердую минеральную фазу. Нейтральность вод и относительно невысокие концентрации в них металлов обусловлены нейтрализующим воздействием карбонатов вмещающих пород и руд.

Ключевые слова: состав вод, хвостохранилище, карбонатные минералы.

Abstract. The chemical composition of the waters formed within the tailings dumps of three lead-zinc deposits located in Eastern Transbaikalia was studied. Their feature is the formation of waters under conditions of combination in the mineral composition of the tailings of sulfide and carbonate mineralization. The studied waters are mainly, neutral and alkaline, HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> and SO<sub>4</sub> Mg-Ca. Arsenic, zinc, cadmium and lead predominate in the microelement composition of drainage waters. The waters are saturated with respect to secondary carbonates and arsenates, which indicates the existence of thermodynamic conditions for the removal from the solution of Ca, Mg, Cu, Zn, Pb, As into the solid mineral phase. The neutralizing effect of carbonates of host rocks and ore bodies of deposits causes a neutral reaction of waters and low concentrations of heavy metals.

**Key words:** waters composition, tailings dumps, carbonate minerals.

Добыча и переработка руды влечет за собой изменение многих компонентов природных ландшафтов, в том числе подземных вод зоны активного водообмена. Последняя четверть XX в. отмечена началом активного количественного изучения водной миграции поллютантов в районах горной добычи. Было установлено, что кислые дренажные стоки рудников содержат аномальные количества тяжелых металлов, оказывающих колоссальное негативное воздействие на биотические компоненты ландшафта.

Значительный рост концентраций сульфатов, высокие содержания взвешенных частиц, концентрации металлов свыше 100 мг/л зафиксированы в кислых сточных водах отработанных медных и свинцово-цинковых рудников в Македонии [1], угольных и золоторудных месторождений в Южной Африке и Канаде [2, 3]. Отработка месторождений в Донецком и Кузбасском угольных бассейнах способствовала формированию шахтных дренажей с максимальной минерализацией до 17 г/л и концентрациями (г/л): SO<sub>4</sub> – 12; Na – 3.4; Mg -1.2; Fe -0.5; Mn -0.07 [4, 5]. Подотвальные дренажи и воды хвостохранилища Тасеевского золоторудного месторождения и Букукинского вольфрамового рудника Забайкалье) характеризуются ростом концентраций (г/л): (Восточное соответственно – до 5.54 и 1.56; алюминия – до 0.15 и 0.13; железа – до 0.77 и 0.10; марганца до 0.09 и 0.01, а также минерализации – до 7.30 и 2.35 [6, 7]. Ничуть не меньшую угрозу представляют также нейтральные и щелочные рудничные стоки, формирующиеся в случае карбонатного состава вмещающих пород. Содержания Pb, Zn и Cd в таких водах невысоки, большую подвижность проявляют анионогенные высокотоксичные включающие As, Sb, Se и Mo [1, 8–10].

Целью данной работы явилось изучение степени техногенной трансформации вод в районах переработки сульфидных свинцово-цинковых месторождений, залегающих в карбонатных породах.

# Объекты и методы исследований

Проведено гидрогеохимическое опробование хвостохранилищ трех разрабатывавшихся ранее свинцово-цинковых месторождений — Благодатского, Акатуевского и Кадаинского, расположенных в юго-восточной части Забайкальского края.

Месторождения относятся к галенит-сфалерит-карбонатно-кварцевой рудной формации нижнепалеозойского возраста [11, 12]. Рудные тела залегают среди карбонатных пород нижнего палеозоя (доломиты и известняки, переслаивающиеся с алевролитами и аргиллитами) и локализуются в контактах карбонатных и алюмосиликатных пород и внутри карбонатных пород, в местах пересечения разломов. Рудные тела представлены пластообразными залежами, штоками и линзами. В составе жильных минералов большую роль играют карбонаты — доломит, анкерит, кальцит. Среди типов полиметаллических руд преобладают пирит-галенит-сфалеритовый (Благодатское месторождение) и галенит-сфалеритовый (Кадаинское и Акатуевское месторождения).

На Благодатском месторождении были опробованы воды ручья Малый Зерентуй, в долине которого расположено хвостохранилище. Пробы отбирались выше хвостохранилища (номер пробы –  $\Gamma$ 3-1), в его центральной ( $\Gamma$ 3-2) и нижней части ( $\Gamma$ 3-3), а также под нижней дамбой ( $\Gamma$ 3-4). На Акатуевском месторождении были опробованы воды дренажа штольни в западном борту хвостохранилища (AK-1), которые затем растекаются по его поверхности и далее фильтруются через пески хвостохранилища, и выходы фильтрационных вод под его нижней дамбой (AK-1). На Кадаинском месторождении был опробован пруд в хвостохранилище ( $\Gamma$ 4-10). Химико-аналитические исследования вод выполнялись в лаборатории Института природных ресурсов, экологии и криологии  $\Gamma$ 4 СО РАН ( $\Gamma$ 6. Чита) общепринятыми методами. Определение концентраций металлов проводилось атомно-абсорбционным методом на спектрофотометре SOLAAR M6. Дополнительно выполнялся анализ водных проб методом ICP-MS в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН ( $\Gamma$ 6. Иркутск) на приборе ELEMENT2 фирмы Finnigan MAT.

# Результаты исследования

Воды месторождений, несмотря на преимущественно сульфидный состав руд, характеризуются нейтральными и слабощелочными значениями рН (таблица), что обусловлено высоким нейтрализующим потенциалом вмещающих карбонатных пород и минералов, присутствующих в рудах [13, 14]. По степени минерализации воды преимущественно пресные. Исключением является пруд Кадаинского хвостохранилища (таблица — номер пробы СБ-10), отсутствие стока из которого определяет более продолжительное время взаимодействия воды с кеком хвостохранилища и способствует усилению влияния процессов испарительного концентрирования на формирование солености вод.

После прохождения вод через пески Благодатского и Акатуевского хвостохранилищ фиксируется заметное обогащение их ионами  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Mg^{2+}$  и другими (таблица), что способствует росту минерализации и смене химического состава с  $HCO_3$  Са на  $SO_4$ – $HCO_3$  Са–Mg и  $HCO_3$ – $SO_4$  Mg–Ca. Воды пруда Кадаинского хвостохранилища  $SO_4$  Mg–Ca состава характеризуются максимальными концентрациями макрокомпонентов и минерализации.

Миграция металлов в нейтральных и щелочных средах ограничена низкой растворимостью их гидроксидов, что отражается на содержаниях компонентов в водах, составляющих, как правило, первые десятки, единицы и менее мкг/л (таблица). Заметное увеличение концентраций металлов зафиксировано в водах под нижними дамбами Акатуевского и Благодатского хвостохранилищ и пруда хвостохранилища Кадаинского месторождения.

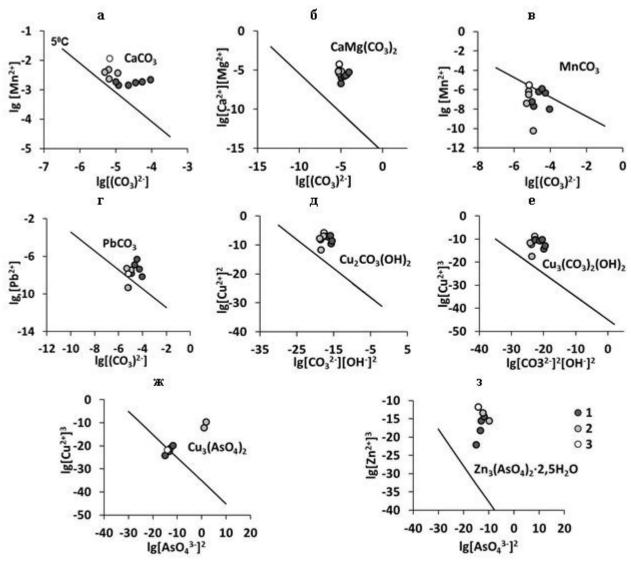
Наибольшие превышения концентраций компонентов над средним составом вод выщелачивания [16, 17] свойственны металлам, относящимся к группе рудообразующих элементов рассматриваемых месторождений — Zn, Pb, Fe, As (таблица). При сравнении с ПДК (таблица) наибольшие превышения были зафиксированы для As, Mn, Fe, Zn и Pb.

Анализ данных по составу исследованных вод и характеру минерального равновесия в соответствии с классификацией, предложенной С.Л. Шварцевым [16, 18], свидетельствует об их принадлежности к двум геохимическим типам — кремнисто-кальциево-магниевому и кремнистому карбонатно-кальциевому [17].

Физико-химические параметры состава вод

	Номер пробы							Средний	
Параметры	Г3-1	Г3-2	Г3-3	ГЗ-4	СБ-10	AK-1	AK-2	ПДК*	состав**
рН	7.70	8.04	8.26	8.30	7.80	7.58	7.25	_	6.75
Eh, mV	295	_	293	255	262	220	-92	_	_
НСО3 <sup>−</sup> , мг/ л	215.0	216.0	204.0	448.0	73.2	281.2	262.9	_	146.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	33.0	73.5	111.3	107.5	1150	307.5	478.2	500	12.4
Cl <sup>-</sup>	2.20	2.30	2.20	2.00	3.70	1.52	1.60	_	10.1
F <sup>-</sup>	0.21	0.20	0.21	0.21	0.72	0.36	0.49	1.5	0.23
Ca <sup>2+</sup>	74.7	57.0	69.3	86.8	459.2	147.7	155.1	-	27.4
$\mathrm{Mg}^{2+}$	2.32	24.4	26.2	58.9	112.5	43.3	42.9	50	11.2
Na <sup>+</sup>	5.02	4.82	4.67	6.47	16.2	7.25	12.8	200	13.8
$K^+$	0.96	0.91	1.05	0.67	5.73	1.21	4.49	_	1.84
Si	5.13	4.96	4.69	3.31	1.10	6.65	10.3	10	6.78
Общая	333.4	379.1	418.9	710.6	1821	789.7	958.0	1000	239.0
минерализация Li, мкг/ л	6.70	7.30	7.30	10.1	29.0	11.5	11.9	30	6.20
Al	945.0	28.0	18.0	174.0	14.2	38.0	19.0	200	190.0
Ti	7.30	0.46	0.25	3.33	0.27	1.22	0.63	100	6.96
V	1.96	0.40	0.23	0.86	0.27	0.24	0.03	100	1.01
Cr	1.28	0.51	0.14	0.43	0.64	0.13	0.22	50	2.78
Mn	37.0	54.0	220.0	49.0	1106	17.0	2361	100	34.3
Fe	852.0	88.0	177.0	269.0	87.0	66.0	8435	300	424.0
Ni	1.76	2.99	2.28	1.46	11.8	7.20	2.10	20	3.11
Co	0.51	0.40	0.44	0.24	3.61	0.09	1.05	100	0.33
Cu	2.05	5.30	13.8	0.50	3.51	3.30	2.00	1000	4.00
Zn	53.0	412.0	982.0	2.82	7846	2111	425.0	1000	30.3
As	18.0	28.0	99.0	2.79	7.50	60.0	1097	10	1.34
Br	7.90	10.4	8.60	12.6	41.0	7.80	7.50	20	40.8
Rb	1.37	0.64	0.57	0.50	13.8	3.11	2.70	_	1.81
Sr	212.0	226.0	241.0	369.0	2526	567.0	1148	7000	88.7
Mo	4.57	6.60	6.10	0.23	2.21	3.07	5.90	250	1.16
Cd	0.18	1.02	2.66	0.009	19.0	1.70	0.68	1	0.20
Sb	2.46	8.60	25.0	0.56	19.0	3.36	0.91	50	0.64
Ba	27.0	25.0	27.0	31.0	21.0	8.30	67.0	700	14.4
Pb	7.90	42.0	150.0	0.19	57.0	2.56	14.4	10	2.18

Примечание. Месторождения: ГЗ — Благодатское, СБ — Кадаинское, АК — Акатуевское; \* — предельно допустимые концентрации химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ГН 2.1.5.1315-03) [15]; \*\* — средний состав вод зоны выщелачивания [16].



Диаграммы насыщения вод Pb-Zn месторождений (1 – Благодатского, 2 – Акатуевского, 3 – Кадаинского) относительно карбонатов (a – кальцит,  $\delta$  – доломит,  $\epsilon$  – родохрозит,  $\epsilon$  – церуссит,  $\delta$  – малахит,  $\epsilon$  – азурит) и арсенатов ( $\kappa$  – ламмерит,  $\epsilon$  – леграндит) при 25 °C.

Близость условий формирования рассматриваемых вод определяет заметное сходство их химического состава. Основным фактором, контролирующим изменение состава вод, является интенсивность водообмена (поверхностный или подземный сток), обусловливающего продолжительность взаимодействия в системе «вода – горная порода» и соответствующий уровень ее эволюционного развития.

Наличие сульфидной минерализации в составе руд, а также размещение продуктов их переработки на дневной поверхности в непосредственном контакте с кислородом воздуха способствуют активизации процессов окисления сульфидных минералов. локализация руд в карбонатных породах способствует нейтрализации образующейся кислотности. В результате формируются нейтральные и щелочные воды, неблагоприятные для миграции большинства рудных компонентов, выпадающих из раствора в виде вторичных гидроксидов и карбонатов. Одновременно с этим формирующиеся воды благоприятны для миграции таких высокотоксичных элементов, как мышьяк и сурьма, содержания которых достигали значений, в десятки и сотни раз превышающих средние концентрации для вод выщелачивания (таблица). Кроме того, зафиксировано значительное превышение предельно допустимых концентраций для Mn, Fe, Zn, As, Cd и Pb, что создает угрозу экологической для прилегающих особенно приуроченность территорий, учитывая исследованных объектов к долинам рек и ручьев.

#### Заключение

Особенностью изученных объектов является формирование вод в условиях сочетания в минеральном составе хвостов сульфидной и карбонатной минерализации. Анионный состав рассматриваемых вод — гидрокарбонатный, сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-сульфатный и сульфатный, катионный — магниево-кальциевый и кальциево-магниевый. Воды пресные и солоноватые, околонейтральные и слабощелочные. В микроэлементном составе дренажных стоков преобладают As, Zn, Cd, Pb, Sb и Mn. Нейтрализующее воздействие карбонатов вмещающих пород и рудных тел месторождений обусловливает нейтральность, невысокие концентрации тяжелых металлов в водах, что, однако, не делает их экологически безопасными.

## Список литературы

- 1. Alderton D.M., Serafimovski T., Mullen B., James S. The Chemistry of Waters Associated with Metal Mining in Macedonia // Mine Water and the Environment. 2005 V. 24, № 3. P. 139–149.
  - 2. McCarthy T.S. The impact of acid mine drainage in South Africa // S. Afr. J. Sci. 2011. V. 107. P. 5-6.
- 3. Fawcett S.E., Jamieson H.E., Nordstrom D.K., McCleskey R.B Arsenic and antimony geochemistry of mine wastes and associated waters and sediments at the Giant Mine, Yellowknife, Northwest Territories, Canada // Applied Geochemistry. 2015. V. 62. P. 3—
- 4. номерности формирования химического состава шахтных вод и их влияние на геоэкологическую ситуацию (ш. Комиссаровская, Восточный Донбасс) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2015. № 6. С. 505–513.
- 5. Счастливцев Е.Л., Быков А.А., Юкина Н.И., Пушкин С.Г. Оценка техногенной нагрузки на бассейны рек горнодобывающего района в южной части Кузбасса // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2015. № 4. С. 333–339.
- 6. Замана Л.В. Геохимия кислых дренажных вод золоторудных месторождений Восточного Забайкалья // Вода: химия и экология. 2013. № 8. С. 92–97.
- 7. Чечель Л.П. Эколого-гидрогеохимические последствия отработки вольфрамовых и молибденовых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 52–63.
- 8. Lindsay M.B.J., Moncur M.C., Bain J.G., Jambor J.L., Ptacek C.J., Blowes D.W. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings // Applied Geochemistry. 2015. V. 57. P. 157–177.
- 9. Nordstrom D.K., Blowes D.W., Ptacek C.J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update // Applied Geochemistry. 2015. V. 57. P. 3–16.
- 10. Zhou J., Nyirenda M.T., Xie L., Baolong L., Yue Z., Liu H. Mine waste acidic potential and distribution of antimony and arsenic in waters of the Xikuangshan mine, China // Applied Geochemistry. 2017. V. 77. P. 52–61.
- 11. Добровольская М.Г., Гордеев В.И. Свинцово-цинковые месторождения // Месторождения Забайкалья Под ред. акад. Н.П. Лаверова (в 2 книгах). М.: Геоинформмарк, 1995. Т. І. Кн. І. С. 70–92.
- 12. Геология и закономерности размещения эндогенных месторождений Забайкалья / Д.И. Горжевский, Н.А. Фогельман, Е.А. Алекторова и др. М.: Недра, 1970. 232 с.
- 13. Paktunc A.D. Mineralogical constraints on the determination of neutralization potential and prediction of acid mine drainage // Environmental Geology. 1999. № 2. P. 103–112.
- 14. Гаськова О.Л., Бортникова С.Б. К вопросу о количественном определении нейтрализующего потенциала вмещающих пород // Геохимия. 2007. № 4. С. 461–464.
- 15. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования: Гигиенические нормативы. ГН 2.1.5.1315-03. М.: Минздрав России, 2003.
  - 16. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза: 2-е изд., исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.
- 17. Чечель Л.П., Замана Л.В. Геохимические типы вод хвостохранилищ свинцово-цинковых месторождений Восточного Забайкалья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 4. 17–25.
- 18. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода порода: в 5 томах. Т. 2.: Система вода порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 389 с.

# АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ЮРСКИХ УГЛЕНОСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ВОДОСНАБЖЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ Г. ИРКУТСКА)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-562-565

#### Шолохов П.А.

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, sholokhov@crust.irk.ru

**Аннотация.** В статье кратко освещается возможность организации водоснабжения за счет подземных вод юрских угленосных отложений, отмечаются особенности зоны пресных вод верхней части гидрогеологического разреза рассматриваемой территории г. Иркутска. Показана неоднородность содержаний железа и марганца в природной гидрохимической обстановке и в условиях техногенного воздействия.

Ключевые слова: источник водоснабжения, глеевый горизонт, некондиционные воды.

**Abstract.** The article briefly highlights the possibility of organizing water supply by using the jurassic coalbearing underground waters deposits, notes the features of the fresh water zone in the upper part of hydrogeological section of the considered territory of Irkutsk. The heterogeneity of the content of iron and manganese in the natural hydrochemical environment and in the conditions of technogenic impact is shown.

Key words: water source, feerous groundwater horizon, unqualify waters.

Централизованное водоснабжение города Иркутска основано целиком на поверхностных водах, аккумулированных в водохранилище Иркутской ГЭС. В последние десятилетия быстрое и плотное, слабо контролируемое освоение прибрежной полосы водохранилища вплоть до уреза воды настолько ухудшило санитарную обстановку, что в снеготаяния и дождей ресурсоснабжающие организации прибегают гипохлорированию питьевых вод. Повышенная уязвимость единственного поверхностного источника обусловила проблему поиска альтернативных и резервных источников водоснабжения. Альтернативой поверхностным водам являются подземные воды, обладающие надежной естественной защищенностью от загрязнения, свойственного урбанизированным территориям. Для города Иркутска такие подземные воды связаны исключительно с породами коренной основы. Опыт использования подземных вод в городе, особенно на периферии, свидетельствует о приемлемой ресурсной обеспеченности децентрализованного водоснабжения. Более того, в черте города находятся участки бывших месторождений с защищенными ранее в ГКЗ СССР запасами.

Можно допустить, что подземные воды пород коренной основы в целом не испытывают сколько-нибудь заметного антропогенного влияния. Но на потребительскую ценность эксплуатируемого водоносного горизонта могут воздействовать смежные гидрогеологические подразделения, содержащие воды с «естественной» некондиционностью, обусловленной высоким содержанием железа и марганца. Подземные воды, представляющие практический интерес в границах города, связаны с угленосными отложениями юрского возраста. Пояс пресных вод изменчив по мощности: на склонах и междуречьях Ангары и Иркута достигает 80–100 м, в основании склонов и в днищах снижается соответственно до 30 м и нуля. Вырождение зоны пресных вод в днищах долин происходит главным образом за счет выпуклости нижней границы, образованной энергичной восходящей разгрузкой подземных вод со всех горизонтов осадочного чехла.

Особенности зоны пресных вод угленосных отложений обусловлены в основном литофациальной неоднородностью пород, обилием рассеянного органического вещества и пиритизацией. Благодаря этому, в подзоне аэрации на различных гипсометрических уровнях на промежуточных водоупорах сформировались водоносные линзы (рис. 1). При нисходящем движении через подзону происходит интенсивное обескислороживание, связанное с окислением органики и сульфидов. Содержание кислорода в родниковом стоке в процессе нисходящего движения снижается с 12 до 2 мг/л.

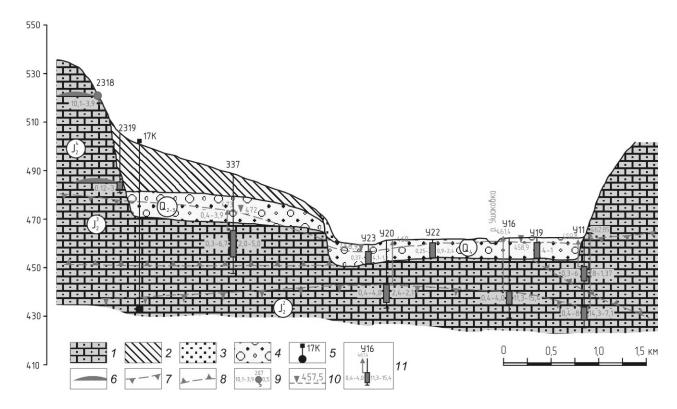


Рис. 1. Гидрогеологический разрез долины р. Ушаковка. I — песчаники, аргиллиты; 2 — суглинки; 3 — песок; 4 — галечники; 5 — уточняющая разрез скважина; 6 — линзы подземных вод; 7 — кровля напорного водоносного горизонта; 8 — подошва межпластового грунтового водоносного горизонта; 9 — родник, слева — минерализация в г/л и температура, справа — дебит в л/с; 10 — уровень грунтовых и напорных вод; 11 — скважина, слева — минерализация в г/л и температура, справа — дебит в л/с и понижение в м, над стрелкой — абсолютная отметка установившегося уровня воды

На долю подзоны насыщения приходится остаточное количество кислорода, которое полностью расходуется в грунтовом потоке, в верхнем 10–15-метровом слое. Таким образом, выше нулевой кислородной поверхности в условиях окислительной обстановки фоновое содержание железа и марганца не превышает соответственно 30 и 50 мкг/л. Ниже нулевой кислородной поверхности окислительно-восстановительный потенциал скачкообразно падает с +350...+450 до +200...+150 мВ. Столь же контрастно увеличивается концентрация железа (до 5–50 мг/л) и марганца (до 1–2 мг/л). Общий химический состав воды – гидрокарбонатный магниево-кальциевый – остается неизменным, но в воде накапливается диоксид углерода, ион аммония и небольшое количество сероводорода. Сульфаты, присутствующие в зоне окисления, в глеевом горизонте полностью исчезают.

Грунтовые и субнапорные воды зоны окисления интенсивно используются, однако зачастую сохранить их естественный облик не удается. При ненарушенном режиме стока оба слоя по разные стороны нулевой кислородной поверхности гидравлически вполне автономны. Но стоит лишь приблизиться или незначительно углубиться в глеевый горизонт, как качество откачиваемой воды мгновенно ухудшается: сказывается отсутствие разделяющего водоупора и нередко высокие фильтрационные свойства глеевого горизонта. Ситуация осложняется к тому же весьма сложной топографией нулевой кислородной поверхности и неоднородностью полей, концентраций железа и марганца.

С подобной ситуацией постоянно приходится сталкиваться при организации децентрализованного водоснабжения на слабоизученных урбанизированных участках. Отсутствие ясного представления о реальной гидрогеохимической зональности пояса пресных вод нанесло большой ущерб и альтернативному источнику централизованного водоснабжения — Ушаковскому месторождению подземных вод, разведанному еще в

прошлом столетии. Причиной отказа от освоения утвержденных в ГКЗ СССР эксплуатационных запасов послужило появление в воде железа в количестве до 3.0 мг/л против 0.2 мг/л при опробовании на стадии разведки. Различие концентраций железа объясняется рядом технических особенностей (при разведке водоотбор производился эрлифтом, на этапе освоения — электропогружным насосом) и условиями отбора проб, их хранения и подготовки к анализу. Некондиционность подземных вод может быть обусловлена и переуглублением скважин при бурении. Для оценки истинной мощности слоя кислородосодержащих вод на одном из кустов разведочных скважин был выполнен дискретный гидрохимический каротаж в режиме общего покоя и возбуждения двух выработок [1]. Результаты каротажа показали, что мощность слоя кислородосодержащих вод не превышает 15 м. При откачке содержание кислорода и железа существенно изменялось за счет значительного притока вод из глеевого горизонта.

Пояс пресных вод подстилается напорным горизонтом содовых вод, не содержащих кислорода, железа и марганца. Поскольку при эксплуатационном режиме кислородные, глеевые и содовые воды гидравлически взаимодействуют, освобождение подземных вод от железа и марганца вполне достижимо. Для этого водоотбор нужно выполнять через напорный горизонт, где величина водородного показателя подземных вод составляет 8.7–9.2. Такая эксплуатационная схема осуществит межпластовое гидрохимическое взаимодействие, в результате чего будут получены приемлемые характеристики качества подземных вод.

Накопление железа и марганца в природных некондиционных подземных водах связано с деградацией растворенного кислорода и процесса его расходования на окисление органических веществ естественного происхождения в водоносном горизонте. На урбанизированных территориях органические вещества в кислородосодержащие подземные воды привносятся извне, например нефтепродуктами. Роль нефтепродуктов в загрязнении подземных вод железом и марганцем можно проиллюстрировать на примере Жилкинской нефтебазы, расположенной на левобережье реки Ангары, в пределах промзоны в Ленинском районе г. Иркутска (рис. 2).

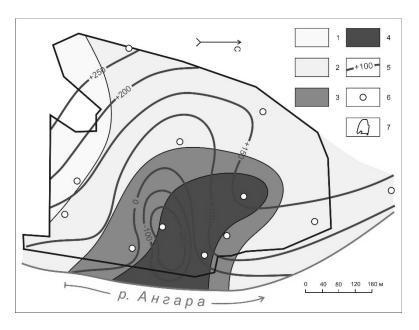


Рис. 2. Железо и марганец в подземных водах на территории Жилкинской нефтебазы. Содержание Fe+Mn, превышающее ПДК, раз: I – менее 100, 2 – 100...300, 3 – 300...500, 4 – более 500; 5 – изолинии окислительно-восстановительного потенциала, мВ; 6 – пункты отбора проб воды; 7 – граница нефтебазы.

Локальный фон в границах промзоны не превышает для железа 600, марганца 200 мкг/л, т.е. суммарно 26 ПДК. Максимальное содержание этих элементов в подземных водах

достигает: Мп – 4490, Fe – 24000 мкг/л (суммарно близко к 700 ПДК). Накопление подвижных форм металлов происходит особенно интенсивно в водовмещающих породах, в составе которых присутствуют карбонатные и гидроксидные формы. В условиях постоянного поступления нефтепродуктов в водоносный горизонт происходит полное и устойчивое обескислороживание воды. Величина окислительно-восстановительного потенциала снижается от +400 до -200 мВ и остается стабильной. Но при этом, несмотря на существенное подкисление, среда близка к нейтральной (рН = 6.7-7.2). Следовательно, существует практически нелимитированный щелочной резерв, представленный карбонатами. Действительно, увеличение минерализации подземных вод до 1 г/л (при фоновом значении 350 мг/л) происходит почти исключительно за счет гидрокарбоната кальция при весьма высоком содержании диоксида углерода (до 130 мг/л). Исходя из этого факта, можно сделать вывод, что железо и марганец находятся в породах преимущественно в подвижных карбонатной и гидроксидной формах.

Существующая тесная корреляция между Еh, железом и марганцем свидетельствует, что металлы в воде представлены главным образом в закисной форме. Вместе с тем накопление этих элементов происходит и в виде металлоорганических соединений при относительно высоких положительных величинах окислительно-восстановительного потенциала (+315...+380 мВ). Такая обстановка сложилась в районе самой старой ТЭЦ города (более 100 лет), расположенной на правом берегу р. Ангары. Сезонные колебания уровня реки с амплитудой до 3 м стимулируют активный водообмен, поэтому загрязнение подземных вод мазутом не привело к полному обескислороживанию: концентрация растворенного кислорода составляла 6–8 мг/л. Очевидно, что в этих условиях закисные формы не могут существовать, но фактически и железо, и марганец присутствуют в подземных водах в содержаниях, превышающих ПДК в 21 и 72 раза соответственно.

В городской черте имеется большое количество источников техногенного загрязнения гораздо меньшего масштаба — АЗС, автомойки, автобазы, автостоянки и др. Современное совокупное влияние всех источников загрязнения на подземные воды обусловливается локальностью их размещения и незначительным ареалом рассеивания вносимой компоненты. С увеличением техногенной нагрузки вообще, а на наиболее уязвимых участках в частности потенциал защищенности подземных вод может быть исчерпан. Техногенные изменения в дальнейшем вполне могут привести к ситуации, когда использовать даже условно кондиционные подземные воды юрских отложений в целях водоснабжения будет невозможно. Данное представление о гидрогеологических условиях застроенной и застраиваемой городской территории основано на продолжающихся наблюдениях за подземной гидросферой в течение последних 10 лет и в настоящее время имеет хорошую детализацию в обозначенных границах.

# Список литературы

1. Шенькман Б.М., Шолохов П.А., Шенькман И.Б. Железо и марганец в пресных подземных водах Иркутска // Вестник ИрГТУ. 2011. №8(55). С. 76–83.

# РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ПО СКВАЖИНЕ № 103А (ТЕРМАЛЬНЫЙ КУРОРТ «ЗАГЗА», 03. БАЙКАЛ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-566-570

Яковлев Д.В., Петров В.В., Табачук А.А.

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, dmitryiakovlev@mail.ru

**Аннотация.** По наблюдениям в 2015–2020 гг. по скважине № 103А (термальный курорт «Загза», оз. Байкал) представлены результаты изучения общего химического, микрокомпонентного и изотопного состава воды, компонентного и изотопного состава водорастворенного газа.

**Ключевые слова:** термальные воды, курорт «Загза», мониторинг.

**Abstract**. Based on the results of monitoring observations in 2015-20 for well №103A (Zagza thermal resort (Lake Baikal)), the results of studying the general chemical, micro-component and isotopic compositions of water, the component and isotopic compositions of water-dissolved gas are presented.

Key words: thermal waters, Zagza resort, monitoring.

Скважина № 103А находится на восточном побережье оз. Байкал (Кабанский район, Республика Бурятия (рис. 1) в 3 км западнее д. Сухой, в 120 м от берега озера. Она является четвертой скважиной, пробуренной в районе термального курорта «Загза». В целях выяснения нефтеносности третичных пород первая скважина — № 1203 — в местности Загза была пробурена в 1932 г. до глубины 282.4 м. С глубины 255.7 м началось бурное газирование с переливом термальной воды с забоя, фундамент вскрыт на глубине 278.4 м. Дальнейшие упоминания о термальных водах соответствуют периоду 1936—1937 гг., когда здесь была пробурена колонковая скважина № 9 (дублер скв. № 1203) до глубины 285 м. На глубине 257.5 м скважиной встречена напорная термальная вода с температурой 31 °С и обильным газированием. В скважине №1203 так же, как и в скважине № 9, в перекрывающих кристаллическое основание песках отмечались «нефтяные выходы из песка» и «вытяжки». Дальнейшие упоминания о термальных водах соответствуют периоду 1938—1940 гг., когда здесь была пробурена разведочная скважина № 27 до глубины 150 м, встретившая безнапорную термальную воду.

Геолого-техническая информация по термальной колонковой скважине № 103А, пробуренной в 1990 г., представляется в соответствии с содержанием информационного стенда ГИН СО РАН, расположенного в непосредственной близости от скважины (рис. 1). В процессе бурения скважины при глубине 278.2 м произошел выброс фонтана горячей воды и газа. После остановки бурения в течение 2–3 суток установился самоизлив на уровне +7 м относительно дневной поверхности с относительно постоянным дебитом горячей воды в пределах 2.0–2.1 л/с и поступлением с ней горючего газа (на пламени горящего газа кипятили воду). Температура воды на самоизливе за прошедшие 30 лет после вскрытия термовыводящей зоны устойчивая (50–52 °C). Таким образом, при бурении вскрыта архейская водоносная зона, связанная с глубинным термовыводящим разломом в кристаллических породах фундамента Усть-Селенгинской депрессии.

В 1993 г. на скважине организованы геохимические наблюдения за составом подземных вод и изменением концентрации радона, позднее проведены площадные исследования методами радонометрии, электроразведки и магниторазведки. С 2006 г. начата автоматическая регистрация потока радона. На данный момент скважина № 103А входит в состав сети наблюдения для целей сейсмического мониторинга опасных сейсмогенных структур вблизи залесенных и развитых промышленных районов Прибайкалья. Исследования на территории стационара «Сухая» вахтовым методом проводит лаборатория методов сейсмопрогноза ГИН СО РАН.

С 11 ноября 2015 г. ВСЕГЕИ скважина № 103A введена в сеть мониторинга в качестве пункта наблюдений № 1 за опасными процессами, связанными с миграцией углеводородов в Центральной экологической зоне БПТ, в рамках реализации мероприятия «Геологическое

изучение опасных процессов, связанных с миграцией УВ в ЦЭЗ БПТ» ФЦП «Охрана оз. Байкал и социально-экономическое развитие БПТ на 2012–2020 гг.».

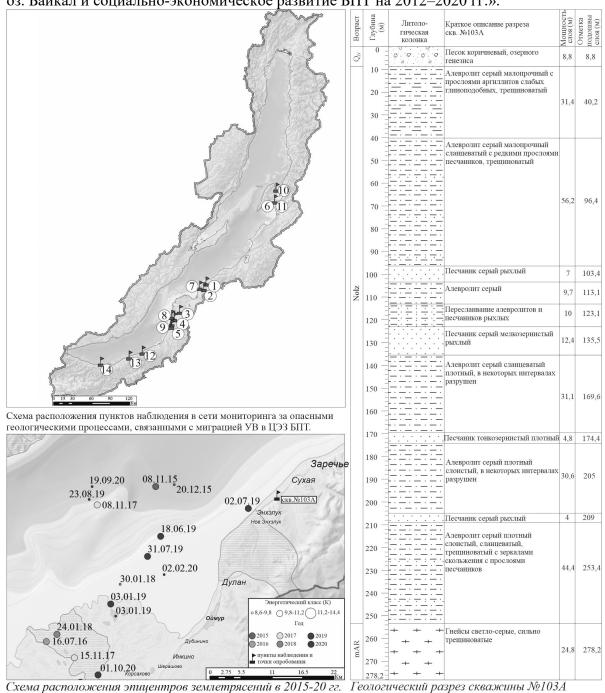


Рис. 1. Геологический разрез скважины № 103A — «Загза», Республика Бурятия: 1. ПН1 — «Загза, № 103A»; 2. ПН2 — «Иркутскгеофизика-9к»; 3. ПН3 — «Ранжурово-3СЛНГ»; 4. ПН4 — «Исток-5ИСТ»; 5. ПН5 — «Посольск-1205»; 6. ПН6 и ТО6 — «оз. Кулиное»; 7. ПН7 и ТО7 — «Провал-15к»; 8. ПН8 и ТО8 — «Сор Черкалово-3ИСТ»; 9. ПН9 и ТО9 — «Посольский Сор»; 10. ПН10 и ТО10 — «ист. Змеиные»; 11. ПН11 — «ист. Кулиных болот»; 12. ПН12 — «Прибой»; 13. ПН13 — «Танхой». Иркутская область: 14. ПН14 и ТО14 — «Мурино».

Для организации сети наблюдений за опасными геологическими процессами, связанными с миграцией УВ, в 2015–2018 гг. в границах ЦЭЗ БПТ введено в эксплуатацию 14 пунктов наблюдения (шурфы, скважины, термальные источники, газовые грифоны), расположенных вдоль восточного побережья оз. Байкал от пос. Мурино (Иркутская обл.) до бухты Змеиной в зал. Чивыркуйском (Республика Бурятия, Баргузинский р-н) (рис. 1).

Комплекс работ на пунктах наблюдения в целом и в скважине № 103А-«Загза» в частности, включает в себя отбор проб воды, свободно выделяющегося или водорастворенного (ВРГ) газа для последующих химико-аналитических исследований (изучение общего химического, микрокомпонентного и изотопного состава воды и компонентного и изотопного состава газов), а также экспресс-аналитические исследования портативными приборами (Hanna Instruments 98121) непосредственно в момент опробования (замер физико-химических параметров воды рН, Еh, Т). Мониторинговые работы на пунктах наблюдения с момента ввода в эксплуатацию проводятся три раза в год, что, совместно с выбранным широким спектром ХАИ, позволяет минимизировать негативный эффект, связанный с дискретностью получаемого материала, и в конечном счете дать оценку изменчивости (или же, напротив, стабильности) во времени процессов, связанных с миграцией УВ. В апреле 2020 г. мониторинговые обследования не выполнялись в связи с карантинными ограничениями из-за распространения инфекции COVID-19.

Изучение общего химического состава вод и компонентного состава газов выполнялось в лаборатории ПГК «Сибгеоком» (г. Иркутск); изотопный состав углерода ( $\delta^{13}C_{CH4}$ ,  $\delta^{13}C_{C2H6}$ ,  $\delta^{13}C_{CO2}$ , ‰, PDB) и воды (dD/d<sup>18</sup>O, ‰, VSMOW) определялся в ЦИИ «ВСЕГЕИ» (г. Санкт-Петербург) аналитиком Назаровой Т.А. по установленной методике на масс-спектрометре ThermoFinnigan MAT DELTA<sup>plus</sup>; анализ содержаний (в ppm) 31 химического элемента в пробах воды выполнялся масс-спектрометрически с индуктивносвязанной плазмой (ICP-MS) в ЦХАЛ «ВСЕГЕИ» с использованием масс-спектрометра Agilent 7700.

На рис. 2 представлены интерпретационные графики и гистограммы различного типа, визуализирующие результаты экспресс-аналитических исследований физико-химических параметров воды (рH, Eh) и характеристик окружающей среды ( $T_{\text{воды}}$ ,  $T_{\text{возд.}}$ ), химико-аналитических исследований проб воды (общий химический и микрокомпонентый состав) и газа (макрокомпонентный, изотопный и микрокомпонентный состав), отобранных на скважине N = 103 В различные периоды.

Согласно результатам 17 опробований скважины в 2015-2020 гг. установлено, что основным анионом, определяющим состав воды, является гидрокарбонат-ион в концентрации в среднем 396-518 мг/л (аномально 229 мг/л в пробах 11.2015). В воде также присутствуют сульфат-ионы 9-62 мг/л и  $Cl^-$  5-68 мг/л. Содержание ионов фтора  $-\sim 0.4-2.0$  мг/л (аномально 18 мг/л в пробе 9.2015).

Основные катионы представлены ионами натрия (совместно с калием) в количестве 186-262 мг/л (аномально 97 мг/л в пробе 11.2015). В воде также содержатся ионы кальция в количестве до 0.5-8.0 мг/л (аномально 13 мг/л в пробах 9.2015) и магния 0-2 мг/л (аномально 9 мг/л в пробе 11.2015). Ионы железа и  $NO_2^-/NO_3^-$  присутствуют в незначительных количествах. Минерализация воды составляет 608-828 мг/л (аномально 448 мг/л в пробах 11.2015). Реакция водной среды pH=6.0-9.4. Показатель Eh принимает строго отрицательные значения и изменяется от -313 до -43 mV.

Температура варьируется в пределах 46.9–52.0 °C. Прослеживается связь между динамикой изменения температуры воды и общей минерализацией, что может характеризовать различную интенсивность процесса смешения вод в зоне сочленения кристаллического массива (резервуара термальных минерализованных вод месторождения Загза) и осадочного бассейна (холодные маломинерализованные воды).

По минерализации и основному ионно-солевому составу вода скважины является очень горячей кремнистой слабосульфидной (с характерным запахом) с относительно повышенной минерализацией гидрокарбонатной натриевой со щелочной реакцией водной среды:

$$M0.7 \frac{HCO_3^-47}{(Na^+ + K^+)44} pH8.6T50.4.$$

Изотопный состав воды изучался в момент первого опробования в сентябре 2015 г. и характеризуется значениями  $\delta D/\delta^{18}O \approx -135.4/-15.7$  ‰, VSMOW.

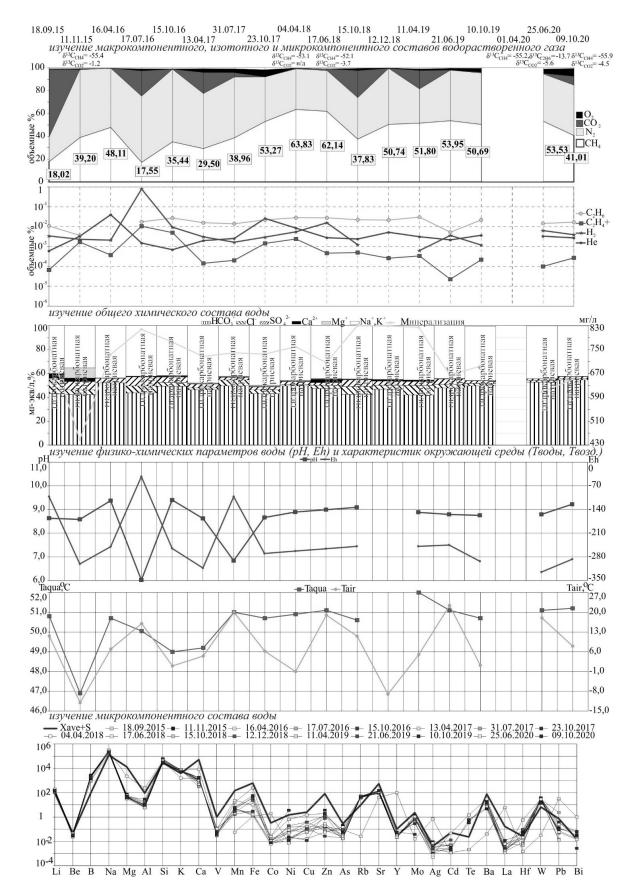


Рис. 2. Результаты мониторинга по скважине № 103A – «Загза».

Ранее авторами на основании ICP-MS анализа 672 проб воды получены распределения, отражающие усредненный профиль распространенности 31 химического элемента для различных типов водопунктов района оз. Байкал. В результате были построены

условные микрокомпонентные кривые, представляющие собой профили распределения значений (Xave+S) для совокупности аналитически определенных содержаний химических элементов в водах различных типов водопунктов (поверхностные воды береговых водопунктов, подземные холодные воды береговых водопунктов, подземные термальные воды береговых водопунктов, подземные воды (холодные и термальные) береговых водопунктов) [1].

Таким образом, сопоставление микрокомпонентных кривых для вод гидротермальной скважины № 103А—«Загза» (тонкие линии, рис. 2) и подземных вод (холодные и термальные) береговых водопунктов района оз Байкал (толстая линия, рис. 2) в целом подтверждает известную ранее для термальных вод района оз. Байкал характерную элементную ассоциацию — Li, B, Na, Si, K, Rb, Te, W, однако показывает отсутствие в этой ассоциации распространенных в других термах Sr и Mo [1].

В составе водорастворенного газа по результатам исследований оказывается сложно выделить постоянно преобладающий компонент. Объемное содержание метана в ВРГ изменяется от 18 до 64 %, причем минимумы соответствуют максимумам содержания углекислого газа  $(9.2015-CO_2\ 59.6\ \%,\ CH_4\ 18\ \%;\ 7.2016-CO_2\ 19.8\ \%,\ CH_4\ 17.5\ \%;\ 4.2017-CO_2\ 18.6\ \%,\ CH_4\ 29.5\ \%;\ 10.2018-CO_2\ 23.8\ \%,\ CH_4\ 37.8\ \%;\ 10.2020-CO_2\ 7.7\ 5\%,\ CH_4\ 41\%,), в остальных же случаях доля углекислоты составляет <math>0.03-0.40\ \%$  (аномально  $16.3\ \%$  в пробе 4.2019). Содержание азота изменяется от 35 до 63 % (аномально 21 % в пробе  $9.2015,\ 29.6\ \%$  4.2019), кислорода от  $0.04\ до\ 6.30\ \%$ . Среднее содержание гелия  $0.008\ \%$  (аномально  $0.04\ \%$  в пробах  $4.2016\ и\ 0.02\ \%-10.2017$ ) и водорода  $0.004\ \%$  (аномально  $0.8\ \%$  в пробах 7.2016). Особо примечательно наличие этана в ВРГ в количестве  $0.004-0.030\ \%$ , а также следов этилена и пропана в количествах  $n\times10^{-3}-n\times10^{-5}$ .

Изотопный состав углерода метана характеризуется значением  $d^{13}C_{CH4}$ =-55.4 %, что, во-первых, позволяет условно отнести его к генотипу смешанного источника поступления, во-вторых, явно выделяет гидротерму «Загза» на фоне подавляющего большинства гидротерм района оз. Байкал, насыщенных изотопно тяжелым и сверхтяжелым углеродом метана [2]. Изотопный состав углерода этана характеризуется значением  $d^{13}C_{C2H6}$ =-13.7 %.

Явной корреляционной связи между газогидрохимическим составом вод скважины № 103А—«Загза» и сейсмическими событиями не наблюдается. Так, сейсмособытие 18.06.2019 г. (эпицентр на расстоянии 21.7 км в р-не зал. Провал, энергетический класс 9.7) не отразилось на составах воды и газа при опробовании 21.06.2019 г. (согласно устному сообщению администратора курорта «Загза» ощутим был один сильный толчок) (рис. 1).

Мониторинговые работы на скв. № 103А—«Загза» позволяют фиксировать поток УВ в составе ВРГ архейской водоносной зоны гидротермальной разгрузки, приуроченной к термовыводящему разлому кристаллического фундамента в СВ части Усть-Селенгинской депрессии. Содержание метана в большей степени зависит от содержания углекислого газа, а период minCH<sub>4</sub> — maxCO<sub>2</sub> фиксируется в среднем один раз в год (лето 2015 г., лето 2016 г., весна 2017 г., осень 2018 г., осень 2020 г). При этом за время проведения наблюдений в 2015—2020 гг. отмечается отчетливый тренд к увеличению объемной доли метана в составе ВРГ как за весь период (17–53 %), так и в среднем по каждому году (с максимумом в 2018 г.).

## Список литературы

- 1. Яковлев Д.В., Петров В.В., Хабарова А.А. Распределение содержаний микро- и макрокомпонентов в природных водах для различных типов водопунктов района оз. Байкал // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Мат-лы четвертой Всерос. конф. с международ. участием (17–20 августа 2020 г., г.Улан-Удэ) / Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2020. С. 118–121.
- 2. Яковлев Д.В., Прасолов Э.М. и др. Изотопно сверхтяжелый углерод метана в газах гидротерм полуострова Святой Нос (оз. Байкал) // XXII симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова (29–31 октября 2019 г.): Расширенные тезисы докладов. М: Акварель, 2019. С. 542–549.

# РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ПО СКВАЖИНЕ № 25-134 (пос. ТАНХОЙ, оз. БАЙКАЛ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-571-575

Яковлев Д.В., Петров В.В., Табачук А.А.

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, dmitryiakovlev@mail.ru

Аннотация. По наблюдениям в 2017–2020 гг. в скважине № 25-134 (район пос. Танхой, оз. Байкал) представлены результаты изучения общего химического, микрокомпонентного состава воды; компонентного и изотопного состава водорастворенного газа. Кратковременное, но значительное повышение объемной доли метана (примерно в 120 раз) и минерализации (в 1.8 раза) при опробовании 9.04.2019 г. может быть следствием сейсмособытия 13.03.2019 г., эпицентр которого располагался на удалении всего 9–11 км.

Ключевые слова: пос. Танхой, землетрясение, скважина с холодными водами, мониторинг.

**Abstract**. Based on the results of observations in 2017-20 for well №. 25-134 (Tankhoy (Lake Baikal)) presents the results of the study of the general chemical, micro-component composition of water; component and isotopic compositions of water-dissolved gas. A short-term but significant increase in the volume fraction of methane (approximately 120 times) and mineralization (1.8 times) during testing on 9.04.2019 may be the result of the seismic event on 13.03.2019, the epicenter of which was located at a distance of only 9-11 km.

Key words: Tankhoy, earthquakes, wells with cold water, monitoring.

Водозаборная скважина № 25-134 хозяйственно-питьевого назначения находится на восточном побережье оз. Байкал примерно в одном километре южнее пос. Танхой (Кабанский район, Республика Бурятия), в ~1.6 км от берега озера близ центральной усадьбы ФГБУ «Байкальский государственный природный биосферный заповедник».

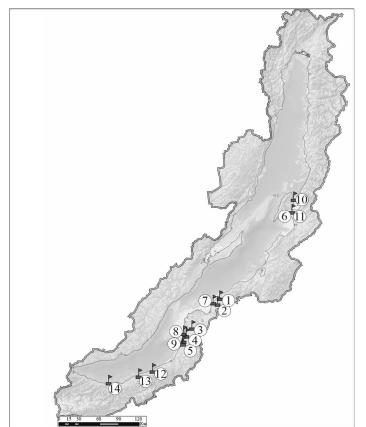
Бурение роторной скважины выполнялось Бурятским участком Читинского спецуправления треста «Востокбурвод» в период с 3 по 19 августа 1980 г. Общая глубина скважины от поверхности земли 100 м. В процессе бурения скважины вскрыты водоносные горизонты в интервалах 40–50 и 70–80 м, приуроченные к галечниковым отложениям. Таким образом скважиной вскрыт водоносный комплекс нижне- и среднечетвертичных (N?) озерных отложений, представленных гравийными, преимущественно галечно-валунными фракциями. В интервалах залегания водоносных горизонтов установлен обломочный фильтр диаметром 168 мм (диаметр проволоки обмотки 1.5 мм, зазор между обмотками 1.5 мм).

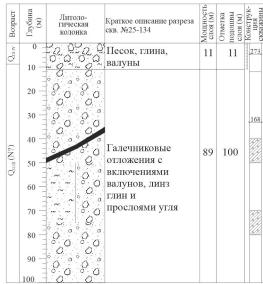
Воды безнапорные. Статический уровень 3 м. Первое опробование производилось откачкой компрессором в период с 11 по 16 августа (144 часа) 1980 г. Дебит скважины при динамическом уровне воды 16 м (понижение уровня 13 м) равен 15 м<sup>3</sup>/час. Первичный анализ воды показал значение рH=7.35 и минерализации 142 мг/л.

С 26 июля 2017 г. ФГБУ «ВСЕГЕИ» скважина № 25-134 введена в сеть мониторинга в качестве пункта наблюдений № 13 за опасными процессами, связанными с миграцией углеводородов в Центральной экологической зоне БПТ, в рамках реализации мероприятия «Геологическое изучение опасных процессов, связанных с миграцией УВ ЦЭЗ БПТ» ФЦП «Охрана оз. Байкал и социально-экономическое развитие БПТ на 2012–2020 гг.».

Для организации сети наблюдений за опасными геологическими процессами, связанными с миграцией УВ, в 2015—2018 гг. в границах ЦЭЗ БПТ введено в эксплуатацию 14 пунктов наблюдения (шурфы, скважины, термальные источники, газовые грифоны), расположенных вдоль восточного побережья оз. Байкал от пос. Мурино (Иркутская обл.) до бухты Змеиной в зал. Чивыркуйском (Республика Бурятия, Баргузинский р-н) (рис. 1).

Комплекс работ на пунктах наблюдения в целом и на скважине № 25-134 в частности включает в себя отбор проб воды, свободно выделяющегося или водорастворенного (ВРГ) газа для последующих химико-аналитических исследований (изучение общего химического, микрокомпонентного и изотопного состава воды и компонентного и изотопного состава газов), а также экспресс-аналитические исследования портативными приборами (Hanna Instruments 98121) непосредственно в момент опробования (замер физико-химических параметров воды рН, Еh, T).





Геологический разрез скважины №25-134

Схема расположения пунктов наблюдения в сети мониторинга за опасными геологическими процессами, связанными с миграцией УВ в ЦЭЗ БПТ.

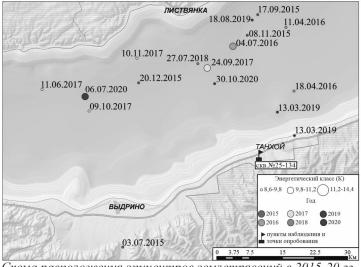


Схема расположения эпицентров землетрясений в 2015-20 гг.

Рис. 1. Геологический разрез скважины № 25–134. Республика Бурятия: 1. ПН1 – «Загза, №103А»; 2. ПН2 – «Иркутскгеофизика-9к»; 3. ПН3 – «Ранжурово-3СЛНГ»; 4. ПН4 – «Исток-5ИСТ»; 5. ПН5 – «Посольск-1205»; 6. ПН6 и ТО6 – «оз. Кулиное»; 7. ПН7 и ТО7 – «Провал-15к»; 8. ПН8 и ТО8 – «Сор Черкалово-ЗИСТ»; 9. ПН9 и ТО9 – «Посольский Сор»; 10. ПН10 и TO10 – «ист. Змеиные»; 11. ПН11 – «ист. Кулиных болот»; 12. ПН12 – «Прибой»; 13. ПН13 - «Танхой». Иркутская область: 14. ПН14 и ТО14 - «Мурино».

Мониторинговые работы на пунктах наблюдения с момента ввода в эксплуатацию проводятся три раза в год, что, совместно с выбранным широким спектром ХАИ, позволяет минимизировать негативный эффект, связанный с дискретностью получаемого материала и в конечном счете дать оценку изменчивости (или же, напротив, стабильности) во времени процессов, связанных с миграцией УВ. В апреле 2020 г. мониторинговые обследования не выполнялись в связи с карантинными ограничениями из-за распространения инфекции СОVID-19. Изучение общего химического состава вод и компонентного состава газов выполнялось в лаборатории ПГК «Сибгеоком» (г. Иркутск); изотопный состав углерода ( $\delta^{13}C_{CH4}$ ,  $\delta^{13}C_{CO2}$ , ‰, PDB) определялся в ЦИИ «ВСЕГЕИ» (г. Санкт-Петербург) аналитиком Назаровой Т.А. по установленной методике на масс-спектрометре ThermoFinnigan MAT DELTA<sup>plus</sup>; анализ содержаний (в ppm) 31 химического элемента в пробах воды выполнялся масс-спектрометрически с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в ЦХАЛ «ВСЕГЕИ» с использованием масс-спектрометра Agilent 7700.

На рис. 2 представлены интерпретационные графики и гистограммы различного типа, визуализирующие результаты экспресс-аналитических исследований физико-химических параметров воды (рH, Eh) и характеристик окружающей среды ( $T_{\text{воды}}$ ,  $T_{\text{возд.}}$ ), химико-аналитических исследований проб воды (общий химический и микрокомпонентый состав) и газа (макрокомпонентный, изотопный и микрокомпонентный состав), отобранных на скважине N 25-134 в различные периоды.

Согласно результатам десяти опробований скважины в 2017-2020 гг., установлено, что основным анионом, определяющим состав воды, является гидрокарбонат-ион в концентрации в среднем 250-353 мг/л (аномально 610 мг/л в пробах 4.2019). В воде также присутствует сульфат-ионы 1.4-31.5 мг/л и  $Cl^-$  3.5-7.2 мг/л. Содержание ионов фтора  $-\sim 0.1-0.8$  мг/л. Нитрит-анионы присутствуют в незначительных количествах -0.27-0.57 мг/л (аномально 1.2 мг/л в пробах 10.2020), тогда как диапазон вариации содержания нитратанионов составляет 0.15-10.00 мг/л (аномально 38 мг/л в пробах 7.2018).

Основные катионы представлены ионами натрия (совместно с калием) в количестве  $46-193~\rm Mг/л$ . В воде также содержатся ионы кальция в количестве  $11-53~\rm Mг/л$  и магния  $3-24~\rm Mг/л$ . Ионы железа присутствуют в незначительных количествах  $-0.05-1.20~\rm Mг/л$ .

Минерализация воды составляет 388-604 мг/л (аномально 905 мг/л в пробах 4.2019). Реакция водной среды pH=6.0-9.7. Показатель Еh принимает строго отрицательные значения и изменяется от -115 до -15 mV. Температура варьируется в пределах 7.4-9.0 °C.

По минерализации и основному ионно-солевому составу вода скважины является холодной с относительно повышенной минерализацией гидрокарбонатной натриевой и кальциево-натриевой со слабощелочной и щелочной реакцией водной среды:

$$M0.48 \frac{HCO_3^-45}{(N\alpha^+ + K^+)26C\alpha^{2+}18} pH7.6T8.3.$$

Ранее авторами на основании ICP-MS анализа 672 проб воды получены распределения, отражающие усредненный профиль распространенности 31 химического элемента для различных типов водопунктов района оз. Байкал. В результате были построены условные микрокомпонентные кривые, представляющие собой профили распределения значений (Xave+S) для совокупности аналитически определенных содержаний химических элементов в водах различных типов водопунктов (поверхностные воды береговых водопунктов, подземные холодные воды береговых водопунктов, подземные термальные воды береговых водопунктов) [1].

Таким образом, сопоставление микрокомпонентных кривых для вод скважины № 25-134 (тонкие линии, рис.2) и подземных вод (холодные и термальные) береговых водопунктов района оз. Байкал (толстая линия, рис. 2) выявляет характерную элементную ассоциацию — Mn, Sr, Ba, часто проявляются Fe и Ni.

В составе водорастворенного газа по результатам исследований преобладают  $N_2$ ,  $O_2$  и  $CO_2$ , причем содержание азота изменяется от 49 до 70 %, кислорода — от 14 до 23 %, углекислого газа — 5–33 %. Объемное содержание метана изменяется от 0.09 до 0.67 %. Максимальное содержание метана 32.6 % в составе водорастворенного газа зафиксировано при опробовании 4.2019 г на фоне явно пониженного содержания кислорода 4.95 % и значительно повышенной минерализации 905 мг/л. Гелий и водород содержатся в незначительных количествах — 0.0011 и 0.0013 % соответственно.

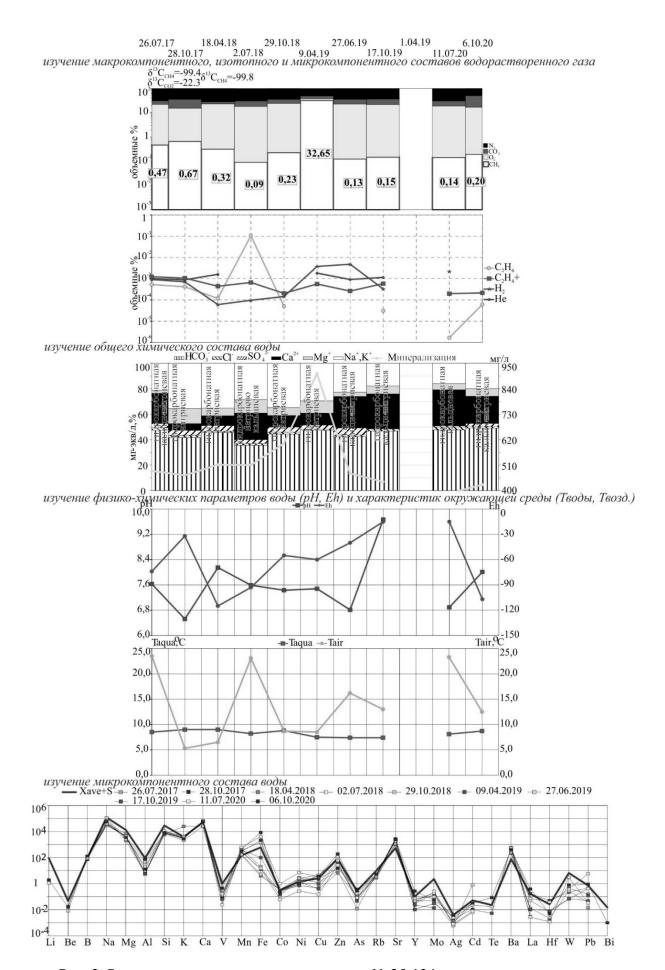


Рис. 2. Результаты мониторинга по скважине № 25-134.

Изотопный состав углерода метана характеризуется значением  $d^{13}C_{CH4}$ = −99.6 ‰, что, во-первых, позволяет условно отнести его к генотипу биохимического источника поступления, во-вторых, указывает на обнаружение в водах скважины № 25-134 наиболее изотопно-легкого углерода метана в сравнении с другими типами природных газов оз. Байкал (газовые гидраты; пузырьковые газы гидротерм, газовых грифонов, грязевых вулканов и т.д.).

Мониторинговые работы на скв. № 25-134 позволяют фиксировать поток УВ в составе водорастворенных газов нижнего этажа неогенового водоносного комплекса района пос. Танхой. Наблюдается вероятная корреляционная связь между газогидрохимическим составом вод скважины № 25-134 и сейсмическими событиями. Так, кратковременное, но значительное повышение объемной доли метана (примерно в 120 раз) и минерализации (в 1.8 раз) при опробовании 9.04.2019 г. может быть следствием сейсмособытия 13.03.2019 г., эпицентр которого располагался на удалении всего 9–11 км (см. рис. 1).

# Список литературы

1. Яковлев Д.В., Петров В.В., Хабарова А.А. Распределение содержаний микро- и макрокомпонентов в природных водах для различных типов водопунктов района оз. Байкал // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Мат-лы четвертой Всерос. конф. с международ. участием (17–20 августа 2020 г., г.Улан-Удэ) / Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2020. С. 118–121.

## ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМЫ ОБРАТНОЙ ЗАКАЧКИ В ПРЕДЕЛАХ МАЛОБОТУОБИНСКОГО АЛМАЗОНОСНОГО РАЙОНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-576-579

#### Янников А.М.

Институт «Якутнипроалмаз» АК АЛРОСА ПАО, Мирный, yannikov90@mail.ru

Аннотация. Отработка коренных месторождений алмазов Мирнинского кимберлитового поля сопряжена с проблемами, связанными со вскрытием открытыми и подземными горными выработками насыщенных и ненасыщенных рассолов метегеро-ичерского, толбачанского водоносных комплексов и олекминского водоносного горизонта, требующих решения по их экологически безопасной изоляции. В данной статье приведена обзорная информация по гидрогеологическим условиям территории исследований, дана краткая гидрогеологическая характеристика природных рассолов метегерской, ичерской, олекминской и толбачанской свит, формирующих высокоминерализованные дренажные воды, рассматриваются аспекты отработанной экологически безопасной схемы обратной закачки дренажных рассолов, проблемы и перспективы развития уже построенных систем.

**Ключевые слова:** Малоботуобинский алмазоносный район, месторождение трубок «Интернациональная» и «Мир», природные рассолы.

**Abstract.** The development of the Mirny kimberlite diamond deposits is associated with problems associated with the opening of open and underground mine workings of saturated and unsaturated brines of the Metegero-Ichersky, Tolbachansky aquifers and the Olekminsky aquifer, which require solutions for their environmentally safe disposal. This article provides an overview on the hydrogeological conditions of the area of research, the brief hydrogeological description of natural brines meagerly, ichersky, olyokma and tolbachinskiy Suite that generates highly mineralized drainage water, discusses the aspects of waste environmentally sound scheme back brines, the problems and prospects of development of already built systems.

Key words: Malobotuobinsky diamondiferous region, «International» and «Mir» pipe deposit, natural brines.

Проблема экологически безопасной утилизации или изоляции дренажных вод, осложняющих отработку месторождений, на настоящий момент очень актуальна, так как в общемировой практике безальтернативно взят вектор не только на снижение техногенной нагрузки на окружающую среду, но и на введение новых, экологически безопасных методик и технических решений. При изучении мировой практики несложно заметить, что наиболее перспективным направлением изоляции практически всех жидких отходов является закачка в недра, в том числе в глубокозалегающие экранированные коллекторы с низкими коэффициентами фильтрации. Именно обратный возврат дренажных и рудничных вод в водоносный комплекс был выбран для изоляции дренажных вод при отработке месторождений «Интернациональная» и «Мир» [1].

Оба месторождения расположены в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которых изменяется в пределах 300–390 м. Верхняя граница ММП контролируется глубиной сезонного протаивания. Нулевая изотерма фиксируется на глубине около 700 м. Локальные опускания кровли ММП приурочены к несквозным таликам, развитым под водотоками и водоемами. Значительные изменения в температурный режим почв и пород внес существующий карьер, где сезонное протаивание пород по бортам в летний период достигает 6–8 м. Согласно общепринятой схеме, которая устанавливает взаимоотношение подземных вод и ММП, в верхних частях осадочного чехла района выделяются три основных типа подземных вод: надмерзлотные, межмерзлотные и подмерзлотные [2, 3, 4].

Дренажные высокоминерализованные воды состоят преимущественно из подмерзлотных рассолов (до 90 %) и технологических вод (до 10 %). Технологические воды генетически связаны с поверхностными пресными водами и используются для приготовления закладочных смесей, орошения шарошек проходческого оборудования и при торкретировании.

Поступающие в выработки рассолы приурочены к метегеро-ичерскому ( $\mathfrak{C}_{1-2}$ ), олекминскому ( $\mathfrak{C}_{1}$ ) и толбачанскому ( $\mathfrak{C}_{1}$ ) водоносным горизонтам и комплексам. Рассолы

данных комплексов имеют существенное отличия, поэтому приведем их краткую раздельную характеристику.

Основной гидрогеологической единицей, осложняющей горно-технические условия отработки коренных месторождений алмазов в пределах Мирнинского кимберлитового поля, является надсолевой метегеро-ичерский водоносный комплекс (МИВК), имеющий региональное распространение. Кровлей комплекса на участке работ является подошва многолетнемерзлых пород (ММП). Подошвой комплекса являются сульфатно-карбонатные породы нижней пачки ичерской свиты. Общая мощность метегеро-ичерского водоносного комплекса на участке месторождения варьируется в пределах 130-150 м. Проницаемые пласты (коллекторы) водоносного комплекса сложены пористыми кавернозными и трещиноватыми известняками, доломитами известковистыми, иногда породы загипсованы. Суммарная эффективная мощность колеблется от 40.2 до 56.8 м. Тип пористости – трещинно-кавернозно-межзерновой, величина Km от 46 до 70 м<sup>2</sup>/сут; коэффициент пьезопроводности (a) в среднем составляет  $10^6$  м<sup>2</sup>/сут. По химическому составу воды комплекса хлоридно-натриевые с минерализацией до 120 г/л. Для вод комплекса характерна сероводородная зараженность. Содержание сероводорода до 130 мг/л. Геохимический облик подземных рассолов надсолевого комплекса является характерным для рассолов выщелачивания [5, 6]. Для рассолов данного типа характерно повышенное содержание сульфатов – до 6000 мг/дм<sup>3</sup> и более. Они обеднены относительно их минерализации микрокомпонентами. Содержание брома не превышает 58, лития – 1.51, рубидия – 0.04, стронция -28.6 мг/дм<sup>3</sup>. Температура подземных вод от -1.5 до -2.0 °C. Состав водорастворенных газов в рассолах комплекса изменяется от азотного до азотно-метанового. Газовый фактор колеблется от 0.01 до 0.25.

Межсолевой олёкминский слабоводоносный комплекс приурочен к нижней пачке карбонатных отложений олёкминской свиты. Породы в интервале коллекторов представлены трещиноватыми и кавернозными доломитами, доломитами известковистыми [5]. Горизонт содержит 2-3 пласта-коллектора (№ 5-6), разделенных между собой глинистыми доломитами, доломито-ангидритами. Мощность пластов-коллекторов от 0.4 до 2.5 м. Общая мощность горизонта колеблется от 19.1 до 30 м. По химическому составу рассолы комплекса хлоридного кальциевого состава с минерализацией до 490 г/дм $^3$ . Они коренным образом отличаются от надсолевых рассолов метегеро-ичерского водоносного комплекса и характеризуются рH=3.7–5.8, высокими концентрациями микрокомпонентов (в мг/дм $^3$ ): брома >2750, калия >8900, стронция >689, лития >38, цинка>3.8, марганца >2.1.

В составе газов преобладает метан (до 95 %-об.), присутствуют тяжелые углеводороды.

Межсолевой толбачанский слабоводоносный комплекс обладает коллекторскими свойствами и приурочен к нижней пачке карбонатных отложений свиты. В породах толбачанской свиты было выделено рассолосодержащих (водонасыщенных) коллекторов (№ 7–15). Эффективная мощность коллекторов составляет 2.0–20.0 м. Породы в интервале коллекторов представлены доломитами тонко- и мелкозернистыми темно-коричневого цвета слаботрещиноватыми. Каждый коллектор содержит от трех до десяти проницаемых пластов-коллекторов, разделённых между собой глинистыми доломитами, доломито-ангидритами. Мощность пластов-коллекторов изменяется от 0.6 до 4.5 м. Тип пористости – межзерновой и межзерново-кавернозный. Коэффициент общей пористости варьируется от 3.7 до 6.8 %. Более высокие значения коэффициента общей пористости (до 6.8 %) отмечаются в коллекторах № 7, 8, 14 и 15. Общая эффективная мощность коллекторов толбачанского водоносного комплекса 62.2 м. Воды комплекса высоконапорные. По химическому составу рассолы комплекса хлоридного кальциевого состава с минерализацией до 510 г/дм<sup>3</sup>. Они несколько отличны от рассолов олёкминского водоносного комплекса и характеризуются величиной рН до 5.8, очень высокими концентрациями брома, калия, стронция, лития, цинка, марганца.

В составе водорастворенных газов доминирует метан (до 98 %-об.), присутствуют тяжелые углеводороды [7].

В настоящее время дренажные воды, поступающие в рудник «Интернациональный», закачиваются в пределах динамического воздействия зоны Западного разлома. Для рудника «Мир» использовалась и будет использоваться в будущем аналогичная зона Восточного разлома [8, 9, 10].

Дальнейшая безопасная отработка данных месторождений формирует следующие проблемы:

- 1. Существующие системы обратной закачки в своем современном виде не смогут полностью обеспечить потребность в закачке формируемых дренажных вод, особенно с учетом роста объемов дренажных вод при возобновлении добычи на руднике «Мир», связанного с ликвидацией водного объекта (затопленных выработок) и увеличением площади осущения.
- 2. Концентрированность существующих закачных скважин приводит к формированию избыточного напорного фронта в эпицентрах закачки, что, в свою очередь, является причиной обратного возврата закачиваемых вод к горным выработкам. Величина возврата по разным оценкам составляет от 25 до 40 %. Увеличение расстояния и разделение закачиваемых объемов между разными участками приведет к общему понижению уровней в эпицентрах закачки и, как следствие, уменьшению разницы напоров.

Решение указанных проблем лежит в плоскости дальнейшего развития систем обратной закачки, а именно как в строительстве дополнительных закачных скважин в рамках – уже опробованных разрывных структур, так и в опробовании перспективных блоковых дислокаций. Обязательным условием должен быть учет не только структурнотектонического строения территории, но и литолого-фациальных особенностей, а также направления естественного потока подземных вод.

В настоящее время рост производительности систем закачки обеспечивается увеличением количества закачных скважин в границах уже исследованных участков с известным геологическим строением, ранее прошедших поисково-оценочный этап, например бурение семи дополнительных закачных скважин в зоне Западного разлома для дренажных вод рудника «Интернациональный», суммарной производительностью закачки ~ 800 м³/час, или строительством участка «Южный» в логе Горелый для развития системы обратной закачки рудника «Мир» за Восточным разломом (было пробурено четыре закачных скважины с суммарной производительностью ~ 300 м³/час).

Перечисленные решения, безусловно, позволяют создать необходимый резерв мощностей. Но главная проблема принимаемых решений — это безальтернативность использования динамических зон Западного разлома (для рудника «Интернациональный») и Восточного разлома [9, 10] (для рудника «Мир»). Из-за возможного падения производительности уже построенных систем обратной закачки в случае кольматации коллекторов метегеро-ичерского водоносного комплекса, а также из-за прогнозируемого увеличения объема формируемых дренажных вод есть необходимость рассмотрения перспективы использования в качестве рассолопоглощающих других блоковых дислокаций и зон тектонических нарушений.

При анализе структурно-тектонической карты района можно сделать вывод о том, что, помимо уже используемых Западного и Восточного разломов, хорошим потенциалом должны обладать структуры Центрального и Восточно-Аппаинского разлома. Уточнения фильтрационных характеристик требуют коллекторы метегерской и ичерской свит в зоне иреляхского грабена [8].

Зона Центрального разлома была уже опробована в процессе ведения поисковооценочных работ на участке Юлегир. Полученные результаты позволяли рассчитывать на строительство участка обратной закачки, но создание в результате закачки дополнительного напорного фронта существенно увеличит приток к карьеру «Мир». Грабенообразная локально-депрессионная структура Центрального разлома характеризуется повышенной проницаемостью в приконтактных зонах с юга на север.

Зона динамического влияния Восточно-Аппаинского разлома требует отдельной апробации, так как имеющиеся на настоящий момент данные указывают на существенный потенциал данной структуры. Работы по оценке данной структуры предусмотрены в рамках проекта «Тектонический» в 2022–2024 гг.

Зона Иреляхского грабена также требует дополнительного изучения, особенно с учетом ее строения, а именно общего понижения кровли кембрийских пород в северовосточном и восточном направлениях с последующим корытообразным расширением в Вилюйской синеклизы. Плановое расположение данной направлении благоприятно ee использования при закачке дренажных «Интернациональный» и «Мир». Именно указанные особенности могут сформировать преобладающее направление массопереноса с запада на северо-восток и существенно уменьшить возврат закачиваемых вод к эксплуатируемым горным выработкам.

Обратная закачка как способ изоляции дренажных вод имеет ряд преимуществ, а именно:

- не требует строительства долговременных бессточных накопителей, сопровождаемого отдельными техническими решениями в части их последующей рекультивации;
- не формирует продуктов, требующих дополнительной изоляции, как например, остаточная рапа, формируемая при осмотической или мембранной воодоочистке;
  - не требует больших энергетических затрат;
- минимизирует и техногенную нагрузку на метегеро-ичерский водоносный комплекс, локализируя в плане площадь распространения депрессионной воронки, возникающей из-за отработки месторождения и сопутствующего опережающего водопонижения [11].

Таким образом, использование метода обратной закачки для формирующихся дренажных вод позволяет исключить возможное негативное воздействие на окружающую среду и поверхностные воды, которое могло бы возникнуть при выборе другого способа их изоляции, и в настоящее время, несмотря на обозначенные проблемы, рассматривается в АК АЛРОСА как наиболее перспективное направление.

- 1. Акишев А.Н., Дроздов А.В., Колганов В.Ф. Горно-геологические особенности коренных месторождений алмазов Якутии. Мирный: Мирнинская типография, 2013. 568 с.
- 2. Сидоренко А.В., Роговская Н.В., Толстихин Н.И., Фомин В.М. Гидрогеология СССР. Т. XX. Якутская АССР. М.: Недра, 1970. 384 с.
  - 3. Толстихин Н.И. Подземные воды мерзлой зоны литосферы. М.–Л.: Госгеолтехиздат, 1941. 204 с.
- 4. Романовский Н.Н. Схема подразделения подземных вод области распространения многолетнемерзлых горных пород // Методика гидрогеологических исследований и ресурсы подземных вод Сибири и Дальнего Востока. М.: Наука, 1966. С. 28–41.
- 5. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Борисов В.Н. и др. Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 3. С. 291–304.
  - 6. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука, 1966. 332 с.
- 7. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 507 с.
- 8. Блажкун Д.В., Гиниятулин И.М., Ивашина Е.И., Коробков Г.В. Материалы к легенде Ботуобинской серии листов геологических карт масштаба 1:50000. Мирный: Министерство геологии РСФСР, 1989. 70 с.
- 9. Атрощенко Ф.Г., Лобанов В.В. Гидрогеоэкологические проблемы утилизации дренажных рассолов при отработке подкарьерных запасов трубки «Мир» // Актуальные проблемы разработки кимберлитовых месторождений: современное состояние и перспективы решения. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2002 С 240–248
- 10. Вигандт В.А. Опыт сооружения и эксплуатации обратной закачки дренажных вод карьера «Мир» // Горный журнал. 1994. № 9. С. 60–62.
- 11. Янников А.М., Бочаров В.Л. Проблема экологически безопасного захоронения дренажных вод рудника «Интернациональный» // Вестник ВГУ. Серия геология. 2019. № 4. С. 99–103.

## VII. МОЛОДЕЖНАЯ СЕКЦИЯ «НОВОЕ В ГИДРОГЕОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ»

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ДЛЯ ПОИСКОВ МЕЖМЕРЗЛОТНЫХ ВОД В ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-580-583

Вавилов С.А., Поезжаев О.С., Минова Е.Н. ВНИМС Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, пос. Чернышевский, rg413el@gmail.com

**Аннотация.** В Западной Якутии стоит вопрос об альтернативных ресурсах чистой питьевой воды в связи с сильным антропогенным загрязнением поверхностных источников. В статье рассмотрено применение метода электротомографии при поиске межмерзлотных подземных вод для жителей поселка Сюльдюкар, приведен фактический материал и результаты обработки полевых данных.

**Ключевые слова:** мерзлотоведение, подземные воды, электротомография, геофизика, вечная мерзлота.

**Abstract.** In Western Yakutia, there is a question about alternative resources of clean drinking water due to the strong anthropogenic pollution of surface sources. The article discusses the application of the method of electrotomography in the search for interpermafrost groundwater for the inhabitants of the village of Suldyukar, the factual material and data of field data processing are presented.

Key words: groundwater, electrotomography, geophysics, permafrost.

В Западной Якутии остро стоит вопрос о поисках альтернативных источников чистой питьевой воды. Так, из-за дождевого паводка, случившегося в 2018 г., вода с высокой концентрацией взвесей и ионов металлов попала в реку Ирелях, а затем в реки Малая Боутобия и Вилюй. Эта чрезвычайная ситуация оставила без питьевой воды жителей Сунтарского, Нюрбинского, Верхневилюйского и Вилюйского районов республики.

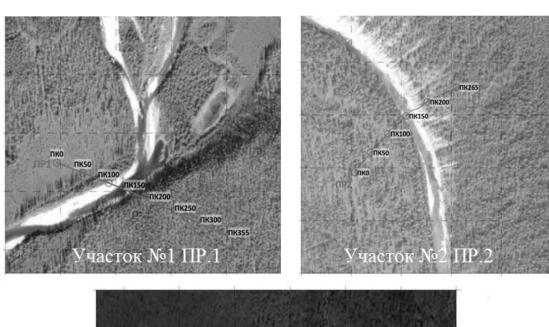
В 2020 г. поступил запрос в Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН на поиск альтернативных источников питьевой воды для жителей поселка Сюльдюкар.

Представители института определили перспективные участки поисков межмерзлотных вод по местам (рис. 1) [1].

В сентябре 2020 г. были проведены полевые геофизические работы методом электротомографии. При выполнении электрометрических исследований использовалась 10-канальная 72-электродная станция Syscal Pro-72 (6 электроразведочных кос по 90 м). Шаг между электродами, равный 5 м, использовался для всех выполненных профилей. Максимальный разнос составил 180 м, что позволило достигать глубины исследований 70 м.

Измерения на каждом геофизическом профиле выполнялись с помощью универсальной 4-электродной установки Веннера-Шлюмберже (AMNB) и дипольно-осевой установки (ABMN). При этом высокая чувствительность дипольно-осевой установки к локальным, в том числе техногенным, субвертикальным неоднородностям в геологическом разрезе использовалась для дифференцирования ложных аномалий.

Основные процедуры обработки полевых материалов производились в программе ZondRes2D (А.Е. Каминский, СПБГУ). На первом этапе осуществлялся контроль качества данных в специальном модуле (Quality control modul) [2]. При этом исходные данные отображались в виде графиков различных параметров и в виде геоэлектрических разрезов (рис. 2). Качество замеров определялось исходя из веса измерений, рассчитанного на основе принципа взаимности, а также путем визуальной оценки гладкости графиков и на основе сравнения исходных параметров и результатов решения прямой задачи от инверсионной модели.



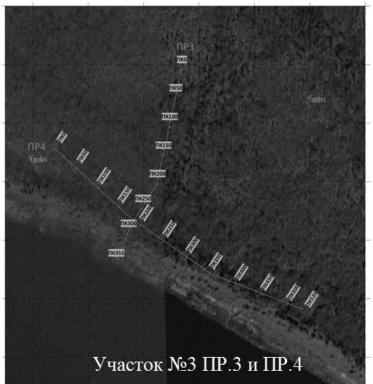


Рис. 1. Участки проведения геофизических исследований по профилям.

На участке исследований № 1, расположенном в 2 км от устья р. Сюльдюкар, был выполнен один профиль ЭТ протяженностью 355 м.

Геоэлектрический разрез по профилю 1 (см. рис. 1), выполненный через русло р. Сюльдюкар. На берегах реки разрез характеризуется высокоомной частью (УЭС более 1000 Ом·м) и мощностью более 60 м от поверхности. Удельные сопротивления такого порядка соответствуют грунтам в мерзлом состоянии. Грунт под руслом реки на геоэлектрическом разрезе отличается пониженными значениями УЭС, находящимися в интервале 50–200 Ом·м. Фиксируемый уровень электрических сопротивлений, вероятно, приурочен к таликовым зонам с признаками обводнения [3].

На участке работ № 2, расположенном в 6 км от устья р. Сюльдюкар, был выполнен один профиль ЭТ протяженностью 265 м. По профилю 2, заданному почти перпендикулярно

руслу р. Сюльдюкар, представленному на рисунке 1, построен геоэлектрический разрез (рис. 2).

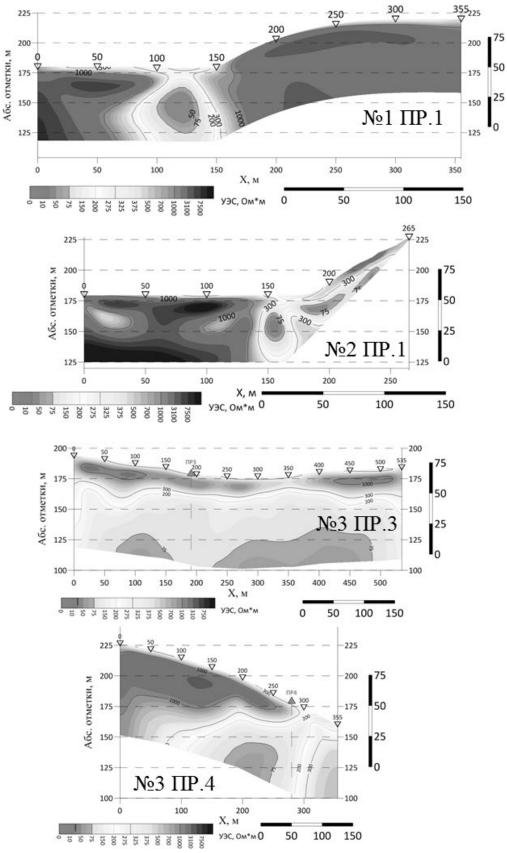


Рис 2. Геоэлектрические разрезы электротомографии по участкам работ.

На геоэлектрическом разрезе правый берег реки отличается высоким уровнем УЭС (более  $1000~{
m Om\cdot m}$ ), мощностью более  $60~{
m m}$  и низкоомной зоной под руслом реки. В

приповерхностной части разреза левого берега реки (мощностью до 10 м) выделяется высокоомная зона с УЭС 300–1000 Ом·м, а ниже отмечается интервал снижения УЭС до 75–200 Ом·м, что, вероятно, соответствует обводненному талику.

На участке работ № 3, расположенном в 7 км ниже по течению от с. Сюльдюкар, в рамках работ было выполнено два профиля ЭТ общей протяженностью 890 м (см. рис. 1). Привязка в тексте дана по геофизическим пикетам. Результаты исследований приведены на геоэлектрических разрезах (рис. 2).

Геоэлектрический разрез по профилю 4 (рис. 2), заданному вдоль р. Вилюй, на всем протяжении характеризуется высокоомной верхней частью (УЭС более 300 Ом·м, местами до 1000 Ом·м), мощностью до 35 м от поверхности. Подстилающий горизонт отличается контрастно низким уровнем УЭС, находящихся в диапазоне 25-200 Ом·м и свойственных талым грунтам. Минимальных значений удельные электрические сопротивления достигают в усредненном интервале абсолютных отметок  $100-120 \, \mathrm{m}$ .

Профиль 3 (рис. 2) пройден перпендикулярно руслу р. Вилюй с пересечением профиля 4 в районе пикета 280. В интервале пикетов 310–355 м профиль выходит на берег реки. В этом интервале на абсолютных отметках 150–100 м наблюдаются значения УЭС до 300–350 Ом\*м, что может быть приурочено к участкам мерзлых грунтов с температурой от 0 до −0.5 °С. Верхняя часть геоэлектрического разреза в интервале пикетов 0–300 м отличается меняющейся мощностью (от 20 м в пикете 290 м до 70 в начале профиля). На ГЭР выделяется зона с высоким уровнем УЭС, находящимся в диапазоне 300–1000 Ом·м и свойственным мерзлым грунтам. В подстилающем горизонте отмечается зона аномального снижения УЭС (менее 200 Ом·м). Значения сопротивлений такого порядка, вероятно, соответствуют обводненным талым грунтам. Эта низкоомная зона имеет выход на поверхность в районе геофизических пикетов 300–310 и продолжается в интервалах 310–355 на приповерхностной зоне мощностью 10 м. К данным участкам приурочены родники, наблюдаемые визуально.

Участок № 1, несмотря на наличие наледи в зимнее время, является бесперспективным так как не было зафиксировано выхода подземных вод на береговых склонах, а на ГЭР отсутствуют аномалии пониженных сопротивлений, что является признаком отсутствия таликовых зон. К перспективным для добычи питьевой воды можно отнести участки №2 и №3, поскольку в этих местах зафиксированы источники подземных вод и выявлены зоны с пониженным удельным электрическим сопротивлением. Это является фактором наличия на данных участках несквозных водоносных таликов.

Работа выполнена при поддержке HO «Целевой фонд будущих поколений Pеспублики Cаха (Якутия)», договор №108/Ц $\Phi$ .

- 1. Алексеев С.В. Криогенез подземных вод и горных пород (на примере Далдыно-Алакитского района Западной Якутии). Новосибирск. Изд-во: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 2000. 95 с.
- 2. Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под ред. В.К. Хмелевского, И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. М.: ГЕРС, 2005. 311 с.
  - 3. П.И. Мельников, Н.И. Толстихин. Общее мерзлотоведение. Новосибирск: Наука, 1974.

#### ОЦЕНКА ВЗАИМОСВЯЗИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ ВОД В УСЛОВИЯХ АРИДНОГО КЛИМАТА С ПОМОЩЬЮ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-584-588

Василевский П.Ю. 1, 2

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, valenciacf@mail.ru

<sup>2</sup> АО «ВНИПИпромтехнологии», Москва, Vasilevskiy.P.Y@vnipipt.ru

Аннотация. Рассматривается аридный бассейн Эйджина, расположенный в нижнем течении р. Хэйхэ (Северо-Западный Китай). Для оценки параметров взаимосвязи подземных и поверхностных вод и анализа общего водного баланса создана геогидрологическая модель бассейна. Модель откалибрована по комплексу наблюдений за уровнями подземных вод, расходами реки, динамикой изменения площади бессточных озер и величины испарения с поверхности земли. Результаты моделирования позволили оценить долю фильтрационных потерь от общего стока, выявить динамику их изменения, а также сформировать рекомендации по регулированию стока нижнего течения р. Хэйхэ для улучшения геоэкологической обстановки

**Ключевые слова:** аридный бассейн, эвапотранспирация, взаимосвязь подземных и поверхностных вод, геогидрологическое моделирование, бессточное озеро.

бассейна Эйджина.

**Abstract:** The considered arid Ejina basin located in the lower reaches of the Heihe River (northwest China). The geohydrological model of the basin is created to estimate the parameters of groundwater and surface water interaction and to analyze the overall water balance. The model was calibrated using a set of observations of groundwater levels, river flow rates, dynamics of changes in the area of drainless lakes and evaporation from the ground surface. The modeling results made it possible to estimate the proportion of leakage losses from the total river flow, to identify their dynamics, and to make recommendations for adjusting the flow of the lower part of Heihe River to improve the geoecological situation of the Ejina basin.

**Key words:** arid basin, evapotranspiration, ground and surface water interaction, geohydrological modeling, drainless lake.

В работе исследуется бассейн Эйджина, расположенный в нижнем течении р. Хэйхэ (Северо-Западный Китай, Автономная Республика Внутренняя Монголия). Река Хэйхэ берет свое начало в горах Цилиньшаншь и в районе Лангисхана (рис. 1) разделяется на две протоки — западную (Хихе) и восточную (Донгхе), которые впадают в систему из шести бессточных озер.

Сток проток регулируется с помощью системы шлюзов. Обе протоки являются сезонными водотоками. Среднегодовой расход протоки Донгхе за 2000–2017 гг. составил  $4.2\cdot10^8$  м³/год, а протоки Хихе  $-1.6\cdot10^8$  м³/год. Русло проток широкое и мелкое, сложено песчаными и гравийными отложениями. В районе дельты р. Хэйхэ состав донных отложений сменяется на песчано-глинистый [1].

Климат бассейна — типичный аридный континентальный. Среднегодовая сумма осадков составляет 36 мм, средняя расчетная величина потенциального испарения — 1471 мм/год. Среднемноголетняя температура воздуха составляет 26 °C летом и –9 °C зимой.

Бассейн Эйджина сложен рыхлыми четвертичными отложениями на глубину нескольких сотен метров. Литологически они представлены широким разнообразием песчано-глинистых, гравийных, галечниковых и других разностей преимущественно рыхлого сложения. В южной части бассейна преобладают грубые гравийно-галечниковые отложения, которые постепенно сменяются песчаными отложениями. В северной части бассейна отложения представлены переслаиванием песчаных и глинистых разностей.

К ним приурочен единый грунтовый водоносный комплекс, который питается в основном за счет потерь из русла р. Хэйхэ (66 %), а разгружается путем эвапотранспирации (90 %). В южной части водоносный комплекс является безнапорным и относительно однородным по вертикали. В северной части бассейна в областях залегания относительно слабопроницаемых отложений он локально подразделяется на безнапорный и один или два межпластовых водоносных горизонта. Глубина залегания грунтовых вод в основном

изменяется от 2 до 4 м [2]. Общая минерализация грунтовых вод в районе исследований имеет заметную пространственную неоднородность, изменяясь от 0.5 до 6.0 г/л. Зона пресных грунтовых вод в основном находится в области, где происходит интенсивная взаимосвязь между подземными и поверхностными водами, а зона вод с повышенной минерализацией — в области разгрузки подземных вод, расположенной в северо-восточной части бассейна. Процессы изменения химического состава и минерализации грунтовых вод в условиях аридного климата бассейна тесно связаны с изменением глубины залегания подземных вод. Однако в данной работе процессы изменения химического состава подземных вод не рассматривались, исследования были направлены на установление уровня грунтовых вод на определенной глубине с целью недопущения опустынивания оазиса Эйджина.

Основную часть территории бассейна занимает каменистая пустыня Гоби. В условиях гипераридного климата фильтрация поверхностных вод из русла р. Хэйхэ представляет собой основной источник питания подземных вод регионального грунтового водоносного комплекса, от положения уровня которого зависит возможность существования растительности в оазисе Эйджина, обрамляющем протоки реки и занимающем дельту восточной протоки.

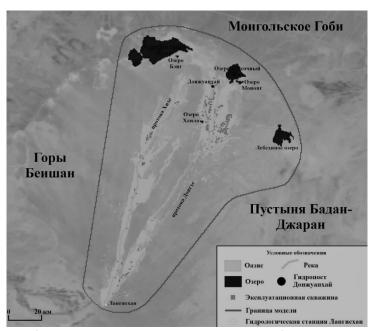


Рис. 1. Область геогидрологической модели бассейна Эйджина.

Увеличение отбора стока в средней части бассейна р. Хэйхэ в последние 50 лет привело к значительным геоэкологическим проблемам в его нижней части, таким как снижение уровня грунтовых вод и опустынивание оазиса Эйджина, а также полное исчезновение бессточных озер, в которые впадает р. Хэйхэ [1].

Возможность дальнейшего освоения исследуемой территории напрямую зависит от решения проблем устойчивого водопользования, среди которых важнейшее значение имеет водообмен в системе «водотоки — подземные воды — растительность». Оценка условий и параметров взаимосвязи между поверхностными и подземными водами представляет собой ключевую задачу в рамках модельного обоснования решения геоэкологических проблем бассейна Эйджина.

Для оценки фильтрационных потерь из нижнего течения р. Хэйхэ с помощью всемирно известного и многократно апробированного кода MODFLOW-2005 [3] была разработана региональная геогидрологическая модель бассейна Эйджина. Моделирование производилось в нестационарной постановке. Период моделирования — с 1 января 2000 г. по 31 декабря 2017 г. Модель разбита на 216 стресс-периодов длительностью в один месяц, в

течение которых расход и ширина проток, потенциальная эвапотранспирация, расход эксплуатационных скважин были постоянными.

Внешние границы модели заданы по контуру границ бассейна. Модель включает западную (Хихе) и восточную (Донгхе) протоки р. Хэйхэ от гидрологической станции Лангисхан и систему из шести бессточных озер. В Лангисхане, где расположена система шлюзов, задан известный входящий расход реки за период времени 2000–2017 гг. для проток Хихе и Донгхе. Размеры модели в плане модели – 140×180 км. Моделируемое пространство аппроксимировано регулярной ортогональной сеткой с размером блока 500×500 м.

Грунтовый водоносный комплекс разбивался на три слоя с различными значениями геофильтрационных параметров, что отражает вертикальную фильтрационную неоднородность водовмещающих отложений. Второй модельный слой характеризует более низкие фильтрационные свойства отложений комплекса в северной части бассейна. Поверхности рельефа и модельных слоев оцифрованы по данным топографической карты масштаба 1:50000 и бурения [4].

Для реализации взаимосвязи с сопредельными бассейнами по внешним границам модели задано граничное условие III рода с помощью пакета GHB [3]. Эвапотранспирационная разгрузка моделировалась с помощью пакета ETS1 [5], который позволяет учесть нелинейную зависимость величины испарения от глубины залегания свободной поверхности. В области моделирования выделены две зоны с различными параметрами эвапотранспирации — области пустыни и оазиса (рис. 1).

Для моделирования взаимодействия подземных и поверхностных вод использован пакет SFR2 [6]. Русло проток было задано прямоугольным, при этом ширина реки была задана для каждого стресс-периода как эмпирическая функция входящего расхода, подобранная по данным дистанционных наблюдений за шириной реки и известным величинам расхода. Озера моделировались с помощью пакета LAK3 [7], учитывающего изменение площади акватории и глубины водоема в зависимости от объема воды в нем. Испарение с открытой водной поверхности озер и рек и выпадение осадков на поверхность водных объектов заданы с помощью пакетов LAK3 и SFR2.

Зоны распределения геофильтрационных параметров заданы по данным предыдущих исследований [4]. На основании предыдущих исследований фильтрационных свойств донных отложений [8–10] русло проток Донгхе и Хихе было разделено на 12 зон с различными значениями  $k_0/m_0$  и ширины реки.

Калибровка параметров модели производилась по комплексу наблюдений за уровнями подземных вод в 62 скважинах, расходами реки на гидрометрическом посту Донжуанхай, динамикой изменения площади бессточных озер и величины испарения с поверхности земли. Объектами калибровки являлись значения коэффициентов фильтрации и гравитационных емкостей грунтового водоносного комплекса,  $k_0/m_0$  донных речных и озерных отложений, параметры проводимости удаленных границ GHB, а также доли стока на границах сегментов при разделении реки на протоки.

Для оценки качества калибровки модели по наблюденным уровням использовались такие критерии, как RSME и коэффициент корреляции. RSME изменяется от 0.21 до 1.27 м в зависимости от точки наблюдений. Коэффициент корреляции между модельными и наблюденными данными для отдельных скважин составляет 0.60–0.94.

Сопоставление модельного и наблюденного изменения площади озера Восточный Хуан приведено на рис. 2. В целом модельная динамика изменения площади соответствует наблюденной. Аналогичный результат получен для озер Западный Хуан и Лебединое.

Основными критериями для калибровки коэффициента перетока донных речных и озерных отложений являлся наблюденный расход реки за период времени 2000–2017 гг. на гидрометрическом посту Донжуанхай на восточной протоке (см. рис. 1), а также данные изменения площадей озер Западный Хуан, Восточный Хуан и Лебединое, полученные с помощью анализа космоснимков Landsat-5, Landsat-7 и Landsat-8 с разрешением изображения 30 м [11]. По состоянию на 31.12.2017 г. наблюденный кумулятивный объем

стока за 18-летний период времени на гидрометрическом посту Донжуанхай составил  $8.27\cdot 10^8~{\rm M}^3$ , а модельный  $-8.35\cdot 10^8~{\rm M}^3$ .

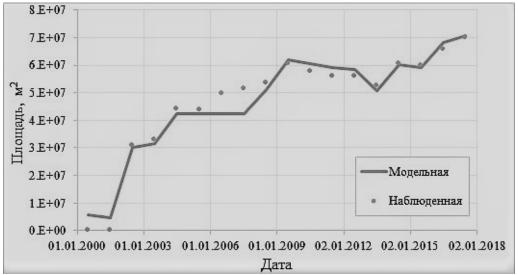


Рис. 2. Модельный и наблюденный кумулятивный объем стока на посту Донжуанхай за  $2000–2017\ {
m rr}.$ 

В условиях гипераридного климата с малой величиной годовых атмосферных осадков рассчитанные по данным дистанционных наблюдений величины испарения с поверхности земли могут с незначительной (равной величине атмосферных осадков) погрешностью рассматриваться как характеристика эвапотранспирационной разгрузки подземных вод. По данным MOD16 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Global Evapotranspiration Project) [12] рассчитаны величины испарения с поверхности земли с разрешением в 0.5 км с 8-дневным, месячным и годовым временными шагами. В качестве исходных данных использованы ежедневные метеорологические данные и восьмидневные данные динамики растительности (тип растительности, альбедо поверхности, индекс площади листьев (LAI)), полученные с помощью дистанционного зондирования по методике MODIS.

Для сравнения модельной и наблюденной эвапотранспирационной разгрузки в пределах оазиса были выбраны два участка, занятые растительностью, общей площадью 80 км². Для сравнения выбраны два периода времени – июль 2017 г. и весь 2017 г. (365 суток). В результате за июль 2017 г. модельная и наблюденная эвапотранспирационные разгрузки различаются всего на 5 %, а за весь 2017 г. – на 22 %. Стоит отметить, что разница между годовой модельной и наблюденной эвапотранспирационными разгрузками составляет 33 мм, что практически точно совпадает с годовой суммой осадков по данным метеостанции Эйджина (30 мм за 2017 г.).

Анализ компонентов баланса подземных вод демонстрирует, что основным источником питания водоносного комплекса являются фильтрационные потери из русла реки (75 % общего питания), а основная часть разгрузки – эвапотранспирация подземных вод (62 % общей разгрузки), что согласуется с литературными данными [2]. Общее пополнение подземных вод составило  $8.68\cdot10^9$  м³, а общая разгрузка –  $1.28\cdot10^{10}$  м³. Разница между общей разгрузкой и питанием составила  $4.08\cdot10^9$  м³, т.е. в целом в бассейне Эйджина еще продолжается региональный спад уровня, хотя в прибрежных зонах и оазисе уровень растет со скоростью несколько сантиметров в год.

По результатам моделирования суточные величины фильтрационных потерь оказались в значительной степени зависимы от величины входящего расхода реки. За весь период моделирования общий кумулятивный объем стока проток Донгхе и Хихе составил  $1.04\cdot10^{10}$  м<sup>3</sup>, а объем потерь речного стока  $-6.32\cdot10^9$  м<sup>3</sup> (61 % от общего стока).

На откалиброванной модели решалась прогнозная задача по установлению расхода, который необходимо пропускать в нижнее течение р. Хэйхэ для стабилизации площадей трех основных терминальных озер — Восточный Хуан, Западный Хуан и Лебединое. Для каждого озера подбирался такой минимальный входящий расход реки, при котором уровень (площадь) озера будет испытывать только годовые колебания, оставаясь в стационарном среднемноголетнем режиме.

В результате прогнозного моделирования оказалось, что для стабилизации площадей озер Восточный Хуан, Западный Хуан и Лебединое в нижнее течение р. Хэйхэ необходимо пропускать  $7.7 \cdot 10^8$  м<sup>3</sup>/год, что на 34 % больше среднего расхода за предыдущие 18 лет (2000–2017 гг.). Из указанного выше расхода порядка 41 % дойдет до терминальных озер, а 59 % сформируют фильтрационные потери, расходуемые в основном на эвапотранспирацию в прибрежной зоне. При этом необходимо распределять порядка 27 % стока в протоку Хихе и 73 % стока — в протоку Донгхе, из которых 60 % в озеро Восточный Хуан и 40 % — в Лебединое озеро. Для озера Западный Хуан среднемноголетняя стабильная площадь составит  $6.7 \cdot 10^7$  м<sup>2</sup> (по состоянию на 2021 г. вода в озере отсутствует), для озера Восточный Хуан —  $7.3 \cdot 10^7$  м<sup>2</sup> (на 30 % больше площади озера по состоянию на 2021 г.), для Лебединого озера —  $6.4 \cdot 10^7$  м<sup>2</sup> (на 50 % больше площади озера по состоянию на 2021 г.).

- 5. Wang, P., Yu J., Zhang Y., Liu C. Groundwater recharge and hydrogeochemical evolution in the Ejina Basin, northwest China // Journal Hydrol. 2013. T. 476. C. 72–86. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.10.049.
- 6. Wang P., Yu J., Zhang Y., Fu G., Min L., Ao F. Impacts of environmental flow controls on the water table and groundwater chemistry in the Ejina Delta, northwestern China // Environmental Earth Sciences. 2011. T. 64, №1. C. 15–24. doi:10.1007/s12665-010-0811-0.
- 7. Harbaugh A.W. MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process. // Reston, VA: US Department of the Interior, US Geological Survey, 2005. C. 6-A16.
- 8. Xie Q. Regional Hydrogeological Survey Report of the People's Republic of China (1:200 000): Ejina K-47-[24] [R]. Chinese People's Liberation Army: Jiuquan. China. 1980.
- 9. Banta E.R. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model Documentation of Packages for Simulating Evapotranspiration with a Segmented Function (ETS1) and Drains with Return Flow (DRT1). U.S. Geological Survey Open-File Report 00-466. 2000. 127 c.
- 10. Niswonger R.G., Prudic D.E. Documentation of the Streamflow-Routing (SFR2) Package to include unsaturated flow beneath streams A modification to SFR1. U.S. Geological Survey Techniques and Methods. 2005. 47 c.
- 11. Merritt M.L., Konikow L.F. Documentation of a Computer Program to Simulate Lake-Aquifer Interaction Using the MODFLOW Ground-Water Flow Model and the MOC3D Solute-Transport Model. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4167. 2000. 146 c.
- 12. Min L., Yu J., Liu C., Zhu J., Wang P. The spatial variability of streambed vertical hydraulic conductivity in an intermittent river, northwestern China // Environmental Earth Sciences. 2013. T. 69, № 3. C. 873–883. doi:10.1007/s12665-012-1973-8.
- 13. Wang P., Pozdniakov S.P., Vasilevskiy P.Y. Estimating groundwater-ephemeral stream exchange in hyperarid environments: Field experiments and numerical simulations // Journal of Hydrology. 2017. T. 555. C. 68–79. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.10.004.
- 14. Vasilevskiy P.Y., Wang P., Pozdniakov S.P., Davis P. Revisiting the modified Hvorslev formula to account for the dynamic process of streambed clogging: Field validation // Journal Hydrol. 2019. № 568. C. 862–866. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.11.034.
- 15. Li B., Zhang, Y.C., Wang P., Du C.Y., Yu J.J. Estimating dynamics of terminal lakes in the second largest endorheic river basin of Northwestern China from 2000 to 2017 with Landsat imagery // Remote Sensing. 2019. V. 11, № 10. doi:10.3390/rs11101164.
- 16. Mu Q., Zhao M., Running S.W. Remote Sensing of Environment Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm // Remote Sens. Environ. 2011. V. 115, № 8. C. 1781–1800.

#### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОДЗЕМНОГО СТОКА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОГО САЯНА

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-589-593

Дмитриев-Добровольский В.Е. $^1$ , Бадминов П.С. $^2$   $^1$ «Иркутское УГМС», Иркутск, vladis.box@yandex.ru  $^2$ Институт земной коры СО РАН, Иркутск, prokop sbad@mail.ru

Аннотация. Основные особенности формирования и распределения подземного стока выявлены в ходе корреляционного анализа величин подземного стока с основными стокоформирующими признаками. На исследуемой территории модуль подземного стока изменяется в широких пределах — от 0.5 до 25 л/(с·км²) и не имеет региональной зависимости от морфометрических характеристик речных водосборов, например от высоты местности. Также не проявляется связь величины подземного стока с площадью водосбора, так как высокая расчлененность рельефа центральной части Восточного Саяна приводит к тому, что размеры площади водосбора не всегда являются показателем глубины эрозионного вреза русла. Основные черты формирования и распределения подземного стока исследуемой территории определяются ландшафтно-климатическими условиями, в первую очередь распределением атмосферных осадков, и гидрогеологическими условиями конкретных водосборов, которые зависят от геолого-структурных особенностей и характера развития многолетнемерзлых пород на разных участках исследуемой территории.

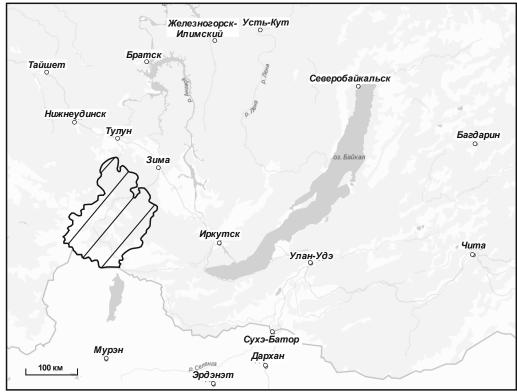
**Ключевые слова**: подземный сток, площадь водосбора, атмосферные осадки, модуль подземного стока.

Abstract. The main formation and distribution features of the underground runoff were identified in the course of the correlation analysis of underground runoff values with the main flow-forming characteristics. The module of the underground runoff in the studied area varies widely from 0.5 l/(s·km²) to 25 l/(s·km²) and does not have regional dependence on the morphometric characteristics of river catchments, for example, on the height of the terrain. Also the relationship between the amount of the underground runoff and the drainage area does not manifest itself, since the great roughness of the relief in the central part of the Eastern Sayan leads to the fact that the size of the drainage area is not always indicative of the depth of the erosion cutting of the channel. The formation and distribution features of the underground runoff in the studied area are specified by the landscapeclimatic conditions, primarily by the distribution of precipitation and hydrogeological conditions of specific drainages determined by geological and structural features and the nature of permafrost development in different areas of the studied area. Keywords: underground runoff, drainage area, precipitation, rate of underground runoff, underground runoff distribution.

Keywords: underground runoff, drainage area, precipitation, module of underground runoff.

Цель данных исследований — выявление основных особенностей формирования подземного стока и его пространственного распределения на основе количественного определения подземного стока центральной части Восточного Саяна и основных стокоформирующих факторов. Исследуемый район целиком находится на территории Алтае-Саянского нагорья в центральной части Восточного Саяна и включает среднее и верхнее течение рек Ока, Большая Белая, Урик, Ерма, Тагна, Зима и Кирей (бассейн р. Ангары), сток которых формируется главным образом за счет атмосферных осадков (рисунок).

Основу геологического разреза исследуемой территории составляют сильно дислоцированные метаморфические породы архея-протерозоя. Они представлены мраморами, гнейсами и кристаллическими сланцами в нижней части разреза и метаморфическими сланцами, слагающими его верхнюю часть. Эти толщи прорваны интрузиями преимущественно палеозойского возраста. перестройку территория претерпела в мезокайнозое, когда древнее основание было вовлечено в горообразовательные процессы, сопровождавшиеся базальтовым вулканизмом и накоплением осадков. Широкое развитие на исследуемой территории получили многолетнемерзлые породы. Для низкогорья и среднегорья характерно островное распространение многолетнемерзлых пород (мощность 10-30 м). Выше гипсометрической отметки 1800–1900 м развита сплошная толща многолетнемерзлых пород мощностью до 200 м и более [1], которая препятствует инфильтрации атмосферных осадков и определяет значительную роль наледного регулирования в этой зоне [2]. Образование наледей определяется не только суровыми климатическими условиями, наличием многолетней мерзлоты, но и достаточно большими запасами подземных вод.



Обзорная карта региона (штриховка с контуром – район исследований).

Основными областями формирования подземных вод являются горные массивы, а общее количество и площадное распределение атмосферных осадков, выпадающих в горах (800–1000 мм), более чем достаточно для формирования их ресурсов. Несмотря на значительную мощность многолетнемерзлых пород, по тектонически ослабленным зонам развиты талики, по которым происходит питание, движение и разгрузка подземных вод, особенно в карбонатных отложениях, благоприятствующих накоплению в них подземных вод.

В основу оценки подземного стока рек положен метод генетического расчленения речного гидрографа [3], базирующийся на различных схемах дренирования реками водовмещающих пород. Процедуре расчленения и реконструкции подверглись более 200 фактических гидрографов, принадлежащих расчетным водосборам р. Ока – п. Сарам, р. Орлик – п. Орлик, р. Тисса – п. Балакта, р. Кирей – п. Уйгат, р. Зима – п. Зулумай, р. Тагна – п. Хор-Тагна, р. Большая Белая – п. Инга, р. Урик – п. Шанхар. Для учета изъятия части стока на наледеобразование проведена реконструкция гидрографов рек в зимний период по экспоненциальному уравнению регрессии, предложенному Ж.В. Буссинеском для описания интенсивности уменьшения дебита родников в периоды отсутствия питания подземных вод. Единичные замеры расходов воды в зимний меженный период произведены на 89 разовых гидрометрических створах. Для приведения данных зимней гидрометрической съемки к использованы переходные многолетним значениям коэффициенты, установленные по соотношениям подземного стока периода выполнения съемок с общей величиной годового стока.

Для выявления основных особенностей формирования и распределения подземного стока использован метод корреляционного анализа, с помощью которого определена степень взаимосвязи подземного стока и морфометрических, геолого-тектонических, климатических характеристик для 89 водосборов рек исследуемой территории. В качестве морфометрических признаков, характеризующих особенности строения речных бассейнов, русел рек и влияющих на подземный сток, согласно источнику [4], приняты: площадь

речного водосбора  $(F, \text{ км}^2)$ , средняя высота речного бассейна (H6, м), средняя отметка продольного профиля русла (Hp, м), средний уклон бассейна (Iб, ‰), средний уклон реки (Ip, %), расстояние до наиболее удаленной точки бассейна (l, км), длина реки (Lp, км). Площади речных водосборов и длина рек сняты с топографических карт различного масштаба с помощью программного обеспечения QGIS. Средняя отметка продольного профиля речного русла снималась с графика продольного профиля, построенного на основе данных с топографических карт. Средняя высота и уклон речного бассейна рассчитывались методом средневзвешенного в пределах высотных поясов. Данные о высотах получены с цифровой модели рельефа SRTM. Средний уклон русла реки представляет собой отношение падения реки, то есть разности высот наиболее удаленных точек, соответствующих истоку и устью, к соответствующей гидрографической длине реки. Оценка порядка водотоков произведена по общеизвестной классификации Р.Е. Хортона [5]. Также в качестве морфологических признаков использовались следующие показатели горизонтального и вертикального расчленения рельефа: частота потоков  $(S, \kappa m^2)$ , густота речной сети  $(D, \kappa m/\kappa m^2)$ , мощность эрозионного вреза рек ( $H_{6p}$ , м), комплексный показатель расчленения рельефа (K). Мощность эрозионного вреза рек определяется как разность между средней высотой водосбора и средней отметкой продольного профиля речного русла. Комплексный показатель расчленения рельефа К представляет собой произведение удвоенной густоты речной сети на мощность эрозионного вреза рек и отражает в совокупности как горизонтальное, так и вертикальное расчленение рельефа речного бассейна. Величины атмосферных осадков (X) сняты с соответствующих карт распределения среднегодовых осадков в бассейне р. Ангары. При оценке подземного стока в горно-складчатых и особенно тектонически активных областях, где преимущественно распространены плотные кристаллические породы, важное значение приобретает изучение трещиноватости водовмещающих пород. Главный параметр трещиноватости – степень раскрытости породы, под которой понимается выраженное в процентах отношение суммы произведений значений длины трещин на их зияние (среднее расстояние между стенками трещин) к исследуемой площади. В тех случаях, когда надежные данные о зиянии отсутствуют, рекомендуется определять коэффициент трещиноватости (Kmp,  $\kappa m/\kappa m^2$ ) как отношение суммарной длины трещин в пределах исследуемого участка к его площади. Приближенно коэффициент трещиноватости можно вычислить как частное от деления суммарной длины разломов к площади водосбора. Результаты корреляционного анализа приведены в таблице.

Анализ корреляционной матрицы признаков показал отсутствие какого-либо одного фактора в формировании подземного стока на всей территории, корреляционные зависимости, построенные для отдельных бассейнов, и карта распределения модуля подземного стока позволили выявить зависимость модуля подземного стока от высоты местности. Эта закономерность не является единой для всей территории и для различных бассейнов рек носит разнонаправленный характер. В бассейнах р. Кирей и Зима наблюдается увеличение модуля подземного стока с высотой водосбора от 1-2 л/( $c \cdot \text{км}^2$ ) в предгорьях до 14-25 л/(с·км<sup>2</sup>) в водораздельных частях Шитского хребта. Эта особенность хорошо согласуется с ведущими факторами формирования подземного стока. Здесь в пределах массива с высотой местности отмечается увеличение количества атмосферных осадков, возрастает интенсивность экзогенных процессов – увеличивается глубина и скорость процессов выветривания, следовательно, возрастает мощность трещиноватой зоны, и улучшаются ее коллекторские свойства. Вполне вероятно, что высокие модули подземного стока связаны с наличием большого количества озер в истоках рек Кирей и Ярма. Сами реки в верховьях пересекают до двух – трех проточных озер, накапливая речной сток в период паводков, и обеспечивают формирование очень высоких значений модульных характеристик в зимнюю межень. В смежном бассейне р. Зима, где на тех же высотных отметках отсутствуют верховые озера, модуль подземного стока в полтора – два раза ниже.

Корреляционная матрица признаков формирования подземного стока

	F	$H_{6}$	H <sub>p</sub>	$I_6$	$I_p$	1	$L_p$	N	S	D	Нвр	К	$K_{Tp}$	X	$M_{\pi.c.}$
F	1.00	0.42	0.24	-0.02	-0.35	0.85	0.89	0.59	-0.23	-0.09	0.60	0.48	-0.10	-0.41	-0.14
$H_6$	0.42	1.00	0.94	0.15	-0.47	0.63	0.58	0.71	-0.42	-0.08	0.74	0.63	-0.32	-0.57	-0.12
Hp	0.24	0.94	1.00	0.02	-0.33	0.40	0.36	0.54	-0.41	-0.11	0.46	0.40	-0.36	-0.44	-0.06
$I_6$	-0.02	0.15	0.02	1.00	-0.07	0.09	0.06	0.17	0.17	0.56	0.33	0.51	0.12	-0.06	-0.10
$I_p$	-0.35	-0.47	-0.33	-0.07	1.00	-0.56	-0.53	-0.75	0.47	-0.11	-0.56	-0.50	-0.13	0.47	0.23
1	0.85	0.63	0.40	0.09	-0.56	1.00	0.95	0.78	-0.34	-0.10	0.83	0.62	-0.14	-0.53	-0.17
$L_p$	0.89	0.58	0.36	0.06	-0.53	0.95	1.00	0.75	-0.33	-0.11	0.78	0.58	-0.13	-0.49	-0.18
N	0.59	0.71	0.54	0.17	-0.75	0.78	0.75	1.00	-0.32	0.14	0.77	0.71	-0.12	-0.46	-0.14
S	-0.23	-0.42	-0.41	0.17	0.47	-0.34	-0.33	-0.32	1.00	0.37	-0.30	-0.10	0.05	0.26	0.03
D	-0.09	-0.08	-0.11	0.56	-0.11	-0.10	-0.11	0.14	0.37	1.00	0.03	0.49	0.20	0.05	-0.08
Нвр	0.60	0.74	0.46	0.33	-0.56	0.83	0.78	0.77	-0.30	0.03	1.00	0.83	-0.13	-0.58	-0.19
К	0.48	0.63	0.40	0.51	-0.50	0.62	0.58	0.71	-0.10	0.49	0.83	1.00	-0.07	-0.47	-0.15
$K_{Tp}$	-0.10	-0.32	-0.36	0.12	-0.13	-0.14	-0.13	-0.12	0.05	0.20	-0.13	-0.07	1.00	-0.04	-0.18
X	-0.41	-0.57	-0.44	-0.06	0.47	-0.53	-0.49	-0.46	0.26	0.05	-0.58	-0.47	-0.04	1.00	0.54
$M_{\text{п.c}}$	-0.14	-0.12	-0.06	-0.10	0.23	-0.17	-0.18	-0.14	0.03	-0.08	-0.19	-0.15	-0.18	0.54	1.00

В бассейнах рек Ока, Большая Белая наблюдается обратная зависимость модуля подземного стока с высотой, связанная в первую очередь с ландшафтно-климатическими условиями. Расположенное в верховьях этих рек Окинское плато является для них водосбором. Co всех сторон оно окружено горными естественным препятствующими проникновению влагонесущих масс, поэтому на этой территории атмосферных осадков выпадает в полтора раза меньше, чем на остальной. Низкие фильтрационные характеристики пород благоприятствуют более активному развитию многолетнемерзлых пород, служащих водоупорным экраном. Уменьшение объема подземного стока происходит и в результате его аккумуляции в процессе наледеобразования. В пределах гидрогеологического массива подземный сток в реки формируется за счет трещинно-грунтовых подземных вод зоны экзогенной трещиноватости и трещинно-жильных вод обводненных разломов. При высокой расчлененности рельефа размеры площади водосбора не всегда являются ведущим показателем глубины дренирования, поэтому здесь не проявляется связь модуля подземного стока с площадью водосбора и не выделяются критические площади, при которых происходит стабилизация подземного стока. Эта зависимость указывает на следующую особенность распределения подземного стока. С одной стороны, в склоновой части подземный сток приурочен к малым водосборам. Хорошее развитие речной сети (среднее значение густоты речной сети D = 0.6, частоты потоков S = 0.27) и глубокие эрозионные врезы русла рек (Hep > 150 м) на малых водосборах (до 200–300 км<sup>2</sup>) обеспечивают благоприятные условия разгрузки подземных вод и высокий темп водообмена. Подземный сток реализуется в русловую сеть в основной массе на площади до 300 км<sup>2</sup> в 60 % изученных бассейнов, редко до 500-600 км<sup>2</sup>. С другой стороны, наглядно демонстрируется роль гидрогеологических условий водосборов в формировании подземного стока различных бассейнов, близких по площади. Таким образом, следующей особенностью формирования подземного стока является зависимость от литологических особенностей и геолого-структурных условий. Отмечается увеличение модуля подземного стока с появлением в составе пород карбонатных разностей, как правило, в различной степени закарстованных и обладающих более высокими фильтрационными свойствами. Так, появление в разрезе осадочно-метаморфических образований нижнего протерозоя карбонатных пород вызывает увеличение модуля подземного стока с 1.5-2.0 до  $5 \text{ л/(c·км}^2)$  и выше при одинаковом увлажнении и схожих морфометрических характеристиках бассейнов.

Повышенные величины модуля подземного стока – до 10 л/(с·км2) и более – в бассейнах рек Кирей и Ярма приурочены к гранитоидам Саянского интрузивного комплекса. Возможно, экзогенная трещиноватость гранитоидов, слагающих горный массив, выше в сравнении с гнейсами и кристаллосланцами метаморфогенных комплексов Урикско-Ийского прогиба. Тектоническая раздробленность метаморфических пород, наоборот, превосходит таковую в гранидоидах в верховьях рек Кирей и Ярма, где закартированы единичные зоны нарушений (Ктр = 0.01-0.17), однако здесь на фоне интенсивного неотектонического воздымания основным фактором рельефообразования явилась ледниковая деятельность. С большой долей вероятности высокий подземный сток обеспечен наличием многочисленных озер (более 150) в истоках рек Кирей и Ярма и крупноглыбовых морен в долинах этих рек, служащих хорошим коллектором для подземных вод. Однако и это не является достаточным условием для накопления подземных вод в гранитоидах Саянского интрузивного комплекса. Вполне возможно, что высокая относительная величина подземного питания обусловлена несовпадением поверхностного и подземного водосборов, но, к сожалению, на данном этапе исследований невозможно указать действительные границы и размеры подземного водосбора, поэтому весь учтенный подземный сток относился только к тому малому водосбору или его части на замыкающем створе, для которого он был определен.

Распределение подземного стока центральной части Восточного Саяна носит дискретный характер, на фоне которого достаточно отчетливо проявляются определенные закономерности: изменение модуля подземного стока с высотой бассейна, влияние количества атмосферных осадков на величину подземного стока, независимость относительной величины подземного стока от площади водосбора. Эти зависимости подземного стока отражают общую направленность процесса на региональном уровне. Подземный сток частных водосборов определяется главным образом гидрогеологическими условиями, связанными с особенностями геолого-тектонического строения, литологического состава пород, морфологии и климата, то есть с основными факторами формирования подземных вод региона.

- 1. Орешкин И.И. Вечная мерзлота на Ботогольском гольце в Восточных Саянах // Землеведение. 1935. Т. 37. Вып. 1. С. 83–97.
- 2. Зонов Б.В., Шульгин М.Ф. Гидрология рек бассейна Братского водохранилища. М.: Наука, 1966. 169 с.
- 3. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. 343 с.
- 4. Писарский Б.И. Закономерности формирования подземного стока бассейна озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1987. 157 с.
- 5. Хортон Р.Е. Эрозионное строение рек и водосборных бассейнов. М.: Изд-во иностранной литературы, 1948. 159 с.

# ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ УТОЧНЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И КАЧЕСТВА ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КИТОЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)

DOI: 10.52619/978-5-9908560-9-7-2021-23-1-594-595

Кураничева А.И., Ланкин Ю.К.

AO «Росгео» AO «Урангео» Ангарская геологическая экспедиция, Иркутск, kuranicheva.ai@mail.ru

**Аннотация:** Обобщены результаты исследований Китойского месторождения пресных подземных вод. Проведены уточнения гидрогеологических, гидрогеохимических параметров участков месторождения. Показаны основные условия формирования рассматриваемого месторождения.

**Ключевые слова:** месторождение пресных подземных вод, гидрогеологические, гидрогеохимические параметры.

**Abstract:** The results of investigations of the Kitoiskoe deposit of fresh groundwater are generalized. The refinements of the hydrogeological and hydrogeochemical factors of the deposit were made. The main conditions for the formation of the considered field are shown.

**Key words:** fresh groundwater deposit, hydrogeological, hydrogeochemical parameters.

Современное водоснабжение населения г. Ангарска осуществляется за счет поверхностных вод р. Ангары. Водозабор города сооружен на р. Ангаре ниже многочисленных сбросов (ливневой канализации, промпредприятий, очистных сооружений и др.) г. Иркутска, что способствует постоянному ухудшению качества поверхностных вод. В маловодные годы уровень реки падает до такой степени, что частично оголяется оголовок водозабора. Такие случаи наблюдались в 2017–2019 гг. Этот факт может вызвать в определенные периоды прекращение работы водозабора. Для решения всех этих проблем и с позиций безопасности на случай чрезвычайных ситуаций необходимо подключение подземных вод в систему водоснабжения города. Таким источником является Китойское месторождение питьевых подземных вод.

В гидрогеологическом отношении территория исследований была охвачена мелко- и среднемасштабными съемками. В результате предшественниками (в 1967–1970 г. – работы по разведке пресных подземных вод, И.А. Ткаченко, в 1993–1994 г. – ревизионно-заверочные работы, И.А. Лумпов) были намечены перспективные участки использования подземных вод, в том числе и для организации централизованного водоснабжения г. Ангарска. Наиболее благоприятным участком для постановки поисково-разведочных работ оказался участок высокой поймы и первой надпойменной террасы правобережья долины р. Китой, расположенный между населенными пунктами Чебогоры и Одинский, где происходит локализация подземных вод, которая связана с особенностями развития Бельской зоны новейшей тектоники [1–5]. Значительные ресурсы подземных вод сосредоточены в карбонатно-карстовых нижнекембрийских отложениях Восточного Саяна. Идет переток этих ресурсов в переуглубленные участки Бельской зоны, протягивающейся вдоль сочленения Присаянья и Иркутско-Черемховской равнины.

Китойское месторождение приурочено К констративной толще аллювия (переуглубленные участки долин c вложенными террасами). Основная часть водовмещающих пород датируется верхнеплиоцен-нижнечетвертичным возрастом. По состоянию на 2014 г. запасы месторождения составляют 207.667 тыс. м<sup>3</sup>/сут, еще 80 тыс. м<sup>3</sup>/сут исключены из государственного баланса, так как по ним невозможно организовать зоны санитарной охраны.

В 2020 г. были выделены средства для доразведки участков Китойского МППВ для организации водоснабжения Ангарского городского округа. По результатам бурения скважин и проведения опытно-фильтрационных работ были уточнены некоторые гидрогеологические параметры и характеристики, которые играют роль при подсчете запасов. По материалам предшественников средняя мощность водоносного горизонта на

Верхнекитойском-1 участке месторождения составляла 23.7 м. По данным бурения 2020 г. средняя мощность водоносного горизонта составила 17.9 м. На участке Нижнекитойский-1 мощность водоносного горизонта подтвердилась. Средний коэффициент фильтрации по результатам работ в 1967–1970 гг. на Верхнекитойском-1 участке составлял 64.4 м/сут, на Нижнекитойском-1 — 73 м/сут. Сопротивление ложа реки  $\Delta$ L в среднем по месторождению составило 100 м. При ревизионно-заверочных работах, проведенных в 1993 г., коэффициент фильтрации на Верхнекитойском-1 участке был принят в 119.5 м/сут, на Нижнекитойском-1 — в 89.8 м/сут,  $\Delta$ L на Нижнекитойском-1 участке было принято в 140 м, расчет сопротивления ложа по скважинам, находящимся на Верхнекитойском-1 участке не производился. По данным работ в 2020 г. средний коэффициент фильтрации на Верхнекитойском-1 и Нижнекитойском-1 участках составил соответственно 145.7 и 115.8 м/сут, сопротивление ложа реки составило 160, 180 м соответственно на Верхнекитойском-1 и Нижнекитойском-1 участках.

Проведенные работы подтвердили хорошее качество воды, которое было выявлено предшественниками. Установлено, что углублять скважины в коренные породы не стоит, так как в юрских отложениях подземные воды не соответствуют требованиям питьевых вод. В ряде скважин на глубине 26—30 м вскрыты воды, по своему составу отличающиеся от состава подземных вод неоген-четвертичного комплекса Китойского МППВ. Минерализация превышает 3 г/л, наблюдается высокое содержание железа и марганца, свойственное подземным водам юрских отложений. В некоторых случаях жесткость подземных вод превышает 7 мг-экв/л. Полученные результаты гидрогеохимических опробований согласуются с результатами работ гидрогеологического доизучения масштаба 1: 200 000 с ГЭИК-200, листа N - 48 - XXXII (г. Ангарск) (А.М. Шестаков, Е.И. Скребнев, Ю.И. Блохин).

Таким образом, в процессе проведенных разведочных работ подтверждены запасы, стоящие на государственном учете, сооружены два водозабора на участках Нижнекитойский-1 и Верхнекитойский-1, уточнены гидрогеологические параметры продуктивного водоносного горизонта, на основании чего выполнена переоценка запасов питьевых подземных вод по промышленной В категории. В результате геологоразведочных работ месторождение подготовлено к эксплуатации, начато строительство инфраструктуры для его освоения.

- 5. Воскресенский С.С. Условия формирования и сохранения поверхностей выравнивания на Средне-Сибирском плоскогорье // Уч. зап. МГУ, Геоморфология. 1956. Вып. 182.
  - 6. Воскресенский С.С. Геоморфология Сибири. М.: Изд-во МГУ, 1962.
- 7. Соколов Н.И. Геологическая история восточной части Иркутского амфитеатра в антропогене как основа инженерно-геологического районирования его территории. Труды лабор. гидрогеол. проблем, 1957. Т. XIV.
- 8. Воскресенский С.С., Гроссвальд И.Г. Об отражении новейшей тектоники в геоморфологии Юго-Восточного Присаянья // Уч. зап. МГУ. Геоморфология. 1956. Вып.2.
- 9. Адаменко О.М., Долгушин И.Ю., Ермолов В.В., Исаева Л.Л., Козловская С.Ф., Леонов Б.Н., Цейтлин С.М. Плоскогорья и низменности Восточной Сибири. Серия «История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока». М.: Наука. 1971.

#### Авторский указатель

Абрамова О.П., 449 Абукова Л.А., 449 Айдаркожина А.С.,127, 179 Акчурин Р.Х., 312 Алексеев В.Р., 259 Алексеев С.В., 5, 132, 479 Алексеева Л.П., 5, 132, 479 Алферов И.Н., 394 Ангахаева Н.А., 137 Аракчаа К.Д., 96 Асеева А.В., 240 Аскаров Ш.А., 466 Астафьев В.П., 360 Аузина Л.И., 384 Аюнова О.Д., 96

Бадминов П.С. 96, 589 Баишев Н.Е., 264 Балобаненко А.А., 53 Барановская Е.И., 240 Белкин И.Ю., 374 Белыш А.В., 427 Белякова Е.Е., 267 Березина О.А., 513 Биктимиров А.В., 463 Болдина С.В., 389 Болотнова Л.А., 547 Борзенко С.В.,142, 184, 466 Боровская Т.А., 527 Бородулина Г.С., 147 Бощенко А.Н., 427

Брагин И.В., 152, 179, 193, 198, 240 Буддо И.В., 427 Бычинский В.А., 326

Вавилов С.А., 580 Василевский П.Ю., 457, 584 Васютич Л.А., 267 Вахромеев А.Г., 312 Вашурина М.В., 68, 316 Вельдемар А.А., 152 Верхотуров А.Г., 267 Виноград Н.А, 93 Волкова Н.А., 321 Волкова М.К., 457 Вологдина И.В., 489 Волошина Е.В., 58, 171 Воронин П.О., 474

Гагарин Л.А., 272 Гаев А.Я., 394 Газизова Т.Ф., 285 Гарькуша Д.Н., 34 Глотов В.Е., 275 Голубев В.А., 281 Гостева И.А., 350 Григорьев Ф.В., 516 Гриневский С.О., 43 Громяк И.Н., 221 Гуляева Ю.В., 458 Гусева Н.В., 96

Данилов К.П., 289 Данилова М.А., 374 Дедюлина Е.А., 43 Деменев А.Д., 463, 513 Деркачев А.С., 225, 400, 444

Диденков Ю.Н., 326

Дмитриев-Добровольский В.Е., 589

Догадкин Д.Н., 221 Дозорцев Н.В., 370 Домрочева Е.В., 78, 483 Дребот В.В., 142, 184 Дульцев Ф.Ф., 355, 400, 552 Дутова Е.М., 405, 489, 543

Елохина С.Н., 48 Ермолович И.Г., 336

Жамбалова Д.И., 137 Жульмина Г.А.,53 Журавлев Н.Б., 430, 474

Замана Л.В., 161, 466 Зарубов М.С., 166 Зелинская Е.В., 471 Землянскова А.А., 259 Зиньков А.В., 230 Зубков Е.А., 34

Иванишин В.М., 312 Иванова И.С., 116, 321 Иванова Т. П., 521 Ильин А.В., 285 Ильин А.И.,427 Ицкович М.В., 341, 360

Казак А.В., 331 Казак Е.С., 331 Казанцева А.С., 410 Калачева Е.Г., 58, 171 Каменский И.Л., 147 Карпов В.В. 267 Катаев В.Н., 336 Каюкова Е.П., 63 Килин Ю.А., 203, 394 Кирюхин А.В., 430, 474 Ковяткина Л.А., 458 Козырев В.И., 68 Коломиец В.Л., 217

Колубаева Ю.В.,116 Комисаренко А.С., 157 Кононов А.М.,479 Конышев А.А., 221 Копылова Г.Н., 415, 474 Копылова Ю.Г., 96, 444 Корзун А.В., 240 Король И.С., 321,483 Кортунов Е.В., 457 Котенко Т.А., 58, 171 Крюкова И.Г., 83, 96

Кряжев А.А., 370 Куделина И.В., 394

Кузеванов К.И., 405,489, 543 Кузеванов К.К., 489 Кузнецов А.Б., 127 Кузьмичёв Б.В., 419 Кулаков В.В., 175, 494 Куприянов Е.А., 499 Кураничева А.И., 419, 594 Курчиков А.Р., 68, 341, 360, 458 Курчиков Д. А., 503 Кустов Ю.И., 73

Лаврушин В.Ю., 127, 179 Ланкин Ю.К., 384, 508, 594

Лапаев В.А., 427 Лебедева Л.С., 289 Левичев М.А., 147

Лепокурова О.Е., 78, 142, 184, 483

Лехатинов А.М., 83, 161 Лехатинова Э.Б.,83 Лехов В.А., 457 Лиманцева О.А., 189 Лисицин М.В., 312 Литвинова И.В., 346, 370 Луканов Д.Д., 235 Лукьянов А.Е., 111 Лысенко А.И., 193 Лямина Л.А.,198, 240

Макарьева О.М., 259 Максимова А.А., 225, 400, 444 Максимович Н.Г., 463, 513 Мартынова М.А., 326 Маслов Е.А., 539 Матвеенко Д.В., 175 Мещерякова О.Ю., 513 Минова Е.Н., 580 Минькевич И.И., 203 Морару К.Е., 88

Наволокина В.Ю., 534 Нагорнова Н.А., 230 Наливайко Н.Г., 78, 350 Наумова О.О., 508 Нестерова Н.В., 259 Неуважаев Г.Д., 516 Никитенков А.Н., 405 Ничкова Л.А., 552

Мохамед Я.Ш., 93

Новиков Д.А., 225, 350, 355, 400, 444, 552 Норова Л.П., 250

Огонёров В.В., 272, 292 Озёрский А. Ю., 423, 521 Озёрский Д. А., 516 Оргильянов А. И.,83, 96 Осташов А.А, 259 Оцимик А.А., 427

Павленко О. Л., 503, 527 Павлов А.А.,152 Павлов С.Х., 208 Павлова Н.А., 292, 304 Павлюков А.И., 101 Пеллинен В.А., 296 Первойкин М.В., 471 Перязева Е.Г., 137 Петров В.В., 566, 571 Петрова Д.И. 157 Плавник А.Г., 341, 360, 503

Пленкин А.В., 516 Плюснин А.М., 137, 235, 255 Поезжаев О.С., 580 Поздняков С.П., 43, 457 Покровский В.Д., 405

Поляков А.Ю., 430 Попов В.Н., 532 Попов Н.Ю., 230 Потурай В.А., 213 Прачкина Т.В., 48 Проскурякова 3.В., 326 Пыряев А.Н., 355, 444

Расторгуев А.В., 198, 516 Редин А.А., 444 Редина М.М., 439 Роговский Г.М., 463 Ружич В.В., 312 Русакова. Ю.О., 316 Рыбников П.А., 434 Рыбникова Л.С., 534 Рыженко Б.Н., 189 Рыжкова С.В., 365 Рыжов Ю.В., 217 Рычкова К.М., 96 Рященко Т.Г., 539

Сальникова Ю.И., 101 Самарцев В.Н., 457 Сафарова Е.А., 449 Сверкунов С.А., 312 Светлаков А.А., 296 Сергеева А.С., 48 Сигора Г.А., 552 Сидкина Е.С., 221 Скиба В.И., 147 Сметанина И.В., 96 Смирнов А.Ю., 434 Смирнов М.В., 217 Сокол Э.В., 127 Солдатова Е.А., 96, 221 Солодов И.Н., 457 Сотникова Е.Е., 543 Сурганов С.В., 111,547 Сурмаажав Д., 106 Сурнин А.И., 346, 370 Сухорукова А.Ф., 225

Табачук А.А., 566, 571 Тагильцев В.С.,111,547 Тагильцев С.Н., 111, 547 Тарасенко И.А., 230 Ташкевич И.В., 312 Теняков Е.О., 374 Токарев И.В., 147 Токарева О.В., 427 Топчиева О.М., 171 Торопов А.С., 221 Трифонов Н.С., 116 Трофимова Н.С., 458 Труфанов А.И., 122 Тугарина М.А., 300 Туровская Е.М., 355 Украинцев А.В., 137, 235 Усманов М.Т., 466 Усманов Р.М., 245 Усманова Л.И., 466

Фадина Т.А., 166 Федоров И.А., 142, 466 Фёдоров И.А., 161 Федоров Ю.А., 39 Федорова С.В., 304 Филиппова Д.С., 449

Харитонова Н.А., 152, 193,198, 240, 331 Хаустов А.П., 439 Хаустов В.В., 326 Хващевская А.А.,96, 444, 552 Хикару Ивамори, 240 Хитоми Накамура, 240 Хмурчик В.Т.,463, 513 Хоменко Т.Ю., 552 Храмцова А.Л., 316 Храмченков М.Г., 245 Христофоров И.И., 289

Цинкобурова М.Г., 250 Цыренжапов С.В., 466

Челноков Г.А., 152, 193,179, 198, 240 Черенева В.А., 326 Черенева В.А., 379 Черкасов А.А., 225 Черных А.В., 350, 355, 400, 552 Чернявский М.К., 137, 235, 255 Чеснокова М.С., 326 Чечель Л.П., 557 Чуйкина Д.И., 321

Шаманова А.А.,370 Шашков М.Ю., 157 Шепелёв В.В., 308 Шестакова А.В., 96 Шихов А.Н., 259 Шолохов П.А., 479, 562 Штенгелов Р.С., 175 Щербак Н.Г., 543

Яковлев Д.В., 566, 571 Яковлев Е.Ю., 147 Янников А.М., 576 Яхин Т.А., 552

### СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Алексеев С.В., Алексеева Л.П. XX, XXI, XXII Всероссийские совещания по	
подземным водам сибири и дальнего востока (2012–2018 ГГ.): ретроспектива	5
Богомолов Ю.Г., Голубев С.М., Ладыгин В.Ф. Как нам организовать управление	
водным хозяйством России?	19
Виноград Н.А. Особенности применения рамочной классификации ресурсов ООН к	
подземным водам	21
Хаустов А.П. Эволюция научных взглядов Е.В. Пиннекера на экологические	
проблемы гидрогеологии	26
І. ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОСФЕРА. ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ	
Василевский П.Ю., Волкова М.К., Солодов И.Н., Кортунов Е.В., Лехов А.В.	
Источники формирования подземных вод неогеновых отложений в палеодолинах на	2.4
Хиагдинском месторождении урана	34
Гарькуша Д.Н., Зубков Е.А., Федоров Ю.А. Оценка разгрузки подземных вод	
четвертичного водоносного комплекса и выноса железа и метана в Азовское море	39
<b>Гриневский С.О., Поздняков С.П., Дедюлина Е.А.</b> Анализ влияния изменения	5)
климата на формирование инфильтрационного питания подземных	
вод	43
Елохина С.Н., Прачкина Т.В., Сергеева А.С. Гидрогеологический мониторинг:	
объекты, задачи, результаты и проблемы на территории Уральского федерального	
округа	48
Жульмина Г.А., Балобаненко А.А. Оценка негативного изменения состояния	
подземных вод Байкальской природной территории	53
Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Волошина Е.В. Кислые сульфатно-хлоридные воды	50
северной части о. Парамушир, Курильские острова	58
университете	63
Курчиков А.Р., Вашурина М.В., Козырев В.И. Ресурсный потенциал пресных	03
подземных вод Ханты-Мансийского автономного округа	68
Кустов Ю.И. Минеральные лечебные термальные воды Баргузинской впадины	
зоны влияния Байкальского рифта	73
Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В., Наливайко Н.Г. Первые данные о составе	
микрофлоры природных вод Нарыкско-Осташкинской площади	
(Кузбасс)	78
Лехатинов А.М., Оргильянов А.И., Лехатинова Э.Б., Крюкова И.Г.	
Минеральные воды Тункинской долины: задачи изучения в связи с массовым	0.3
развитием экологического туризма	83
Морару К.Е. Сравнительный анализ методов определения естественных ресурсов	00
подземных вод	88
фильтрационным свойствам дочетвертичных водовмещающих	
пород	93
Оргильянов А.И., Копылова Ю.Г., Аракчаа К.Д., Гусева Н.В., Хващевская	75
А.А., Крюкова И.Г., Бадминов П.С., Рычкова К.М., Шестакова А.В., Солдатова	
Е.А., Сметанина И.В., Аюнова О.Д. Минеральные воды республики Тыва:	
исследования последних лет	96

Павлюков А.И., Сальникова Ю.И. Краткая история изучения и масштабы	
техногенного воздействия на апт-альб-сеноманский водоносный комплекс Западной	
Сибири	101
Сурмаажав Д. Термальные воды центральной Монголии	106
Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Лукьянов А.Е., Сурганов С.В. Тектоническая	
стратификация палеозойских терригенных отложений Кузбасса и Восточного	
Донбасса	111
Трифонов Н.С., Колубаева Ю.В., Иванова И.С. Гидрогеологические условия	
северной части Иртыш-Обского артезианского бассейна	116
Труфанов А.И. Минеральные воды северной части Московского артезианского	
бассейна	122
II. СИСТЕМА «ВОДА – ПОРОДА». ШАГИ ВПЕРЕД	
Айдаркожина А.С., Лаврушин В.Ю., Кузнецов А.Б., Сокол Э.В. Изотопный	
состав стронция в водах грязевых вулканов Керченско-Таманской	
области	127
<b>Алексеева Л.П., Алексеев С.В.</b> Стронций и изотопное отношение <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	
подземных рассолов северо-восточной части Ангаро-Ленского артезианского	
бассейна	132
Ангахаева Н.А., Плюснин А.М., Украинцев А.В., Чернявский М.К., Перязева	
Е.Г., Жамбалова Д.И. Гидрохимические особенности озера Котокельского	137
Борзенко С.В., Дребот В.В., Федоров И.А., Лепокурова О.Е. Геохимия подземных	
вод Юго-Восточного Забайкалья	142
Бородулина Г.С., Токарев И.В., Яковлев Е.Ю., Левичев М.А., Каменский И.Л.,	
Скиба В.И. Закономерности формирования железистых минеральных вод (курорт	
«Марциальные воды», Карелия) по изотопно-геохимическим ( $\delta^2$ H, $\delta^{18}$ O, $^3$ H, $^{3,4}$ He,	
$^{20}$ Ne, $^{234}$ U/ $^{238}$ U) данным.	147
Брагин И.В., Челноков Г.А., Харитонова Н.А., Павлов А.А., Вельдемар А.А.	
Особенности химического состава термальных вод и вмещающих пород Тальского	
месторождения (Магаданская область)	152
Петрова Д.И. Распределение стабильных изотопов водорода и кислорода в	152
природных водах г. Казани	157
Замана Л.В., Лехатинов А.М., Фёдоров И.А. Геохимия и бальнеологическая	157
типизация термальных вод жемчугских скважин (Тункинская впадина, Республика Бурятия)	161
Зарубов М.С., Фадина Т.А. Особенности гидрохимического состава подземных	101
вод в пределах краевой части Салбатской мульды и его изменение при	166
эксплуатации групповыми водозаборами	166
Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Волошина Е.В., Топчиева О.М. Кислые термальные	
источники острова Уруп (Курильские острова): химический состав, вынос	171
магматических и породообразующих компонентов	1/1
Кулаков В.В., Штенгелов Р.С., Матвеенко Д.В. Взаимодействие подземных и	
речных вод Амура и вертикальные перетоки в водоносном горизонте Хабаровского	175
водного узла	175
Лаврушин В.Ю., Челноков Г.А., Брагин И.В., Айдаркожина А.С. Изотопно-	
геохимические особенности ( $\delta^{13}$ C, $\delta^{15}$ N, $\delta^{18}$ O и $\delta^{2}$ H) азотных и углекислых вод	170
Забайкалья.	179
<b>Лепокурова О.Е., Борзенко С.В., Дребот В.В.</b> Изотопный состав ( $\delta^{18}$ О, $\delta$ D, $\delta^{13}$ С,	104
$\delta^{34}$ S) подземных вод территории Торейских озер (Восточное Забайкалье)	184
Лиманцева О.А., Рыженко Б.Н. Комплексирование лабораторных методов с	
физико-химическим моделированием как путь повышения достоверности прогноза	100
состояния системы «вода – порода»	189

Лысенко А.И., Брагин И.В., Челноков Г.А., Харитонова Н.А. Физико-
химическое моделирование процессов формирования термальных вод на примере
месторождений Тумнин и Анненское (Сихотэ-Алинь)
Лямина Л.А., Харитонова Н.А., Расторгуев А.В., Челноков Г.А., Брагин И.В.
Генезис и эволюция низкоэнтальпийных азотных терм в гранитных массивах на
примере месторождения Кульдур
Минькевич И.И., Килин Ю.А. Типы подземных вод соляных месторождений (на
примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей)
Павлов С.Х. Особенности строения и процессы формирования сложно
построенного гидрогеохимического разреза на юго-западном фланге Байкальской
рифтовой зоны
<b>Потурай В.А.</b> Новые данные о составе органического вещества в Анненских термальных водах
Рыжов Ю.В., Коломиец В.Л., Смирнов М.В. Аллювий низких пойм речных долин
бассейна р. Селенги: строение, возраст этапы формирования
Сидкина Е.С., Конышев А.А., Солдатова Е.А., Торопов А.С., Догадкин Д.Н.,
Громяк И.Н. Химический состав и формы нахождения металлов в воде источника
«Радоновый» (Питкярантский рудный район, Республика Карелия)
Сухорукова А.Ф., Черкасов А.А., Новиков Д.А., Максимова А.А., Деркачев
А.С. Гидрогеологические условия карьера Борок (г. Новосибирск)
Тарасенко И.А., Зиньков А.В., Попов Н.Ю., Нагорнова Н.А.
Гидрогеохимические аномалии в угленосных структурах юга Приморья: источники
и формы накопления редких металлов (на примере Раковской впадины)
Украинцев А.В., Плюснин А.М., Чернявский М.К., Луканов Д.Д. Формирование
состава РОВ и РЗЭ на месторождениях углекислых минеральных вод Восточного Забайкалья
Харитонова Н.А., Челноков Г.А., Брагин И.В., Асеева А.В., Лямина Л.А.,
Барановская Е.И., Корзун А.В., Хитоми Накамура, Хикару Ивамори. Геохимия
минеральных вод восточной окраины Евразии: циркуляция флюида в зоне субдукции и за ее пределами
<b>Храмченков М.Г., Усманов Р.М.</b> Моделирование насыщенной и ненасыщенной фильтрации в набухающих породах
<b>Цинкобурова М.Г., Норова Л.П.</b> Геолого-гидрогеологические особенности
Ижорской возвышенности и Путиловского плато в историческом аспекте освоения северо-запада Новгородских земель
северо-запада Новгородских земель
термального источника
III. ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ И МНОГОЛЕТНЯЯ МЕРЗЛОТА
Алексеев В.Р., Макарьева О.М., Шихов А.Н., Нестерова Н.В., Землянскова
<b>А.А., Осташов А.А.</b> Новые данные о гигантских наледях-тарынах северо-востока России
России
«Лена» на отрезке Иенгра – Чульман
Верхотуров А.Г., Васютич Л.А., Белякова Е.Е., Карпов В.В. Изменение
экологического состояния подземных вод Забайкальского края в результате
Texhorehesa 26'
Гагарин Л.А., Огонёров В.В. Родники пресных межмерзлотных подземных вод в
Западной Якутии
<b>Глотов В.Е.</b> Гидрогеологические отличия геодинамически разных террейнов
<b>Голубев В.А.</b> Об охлаждении осадочных толщ восходящим потоком метана
Ильин А.В., Газизова Т.Ф. Техногенное воздействие рассолов среднекембрийского

водоносного	комплекса	трубки	Удачно	ой і	на тем	пературу	массива
многолетнемерз	злых пород	В П	роцессе	экспл	гуатации	участка	закачки
«Левобережный							
Лебедева Л.С.,	Христофоро	в И.И.,	Данилов	К.П. (	Субаэрал	ьные надмер	рзлотные
водоносные тал	ики Центральн	ной Якут	гии				
Огонёров В.В	., Павлова	<b>Н.А.</b> Г	идрогеоло	гичесь	кий реж	им подземі	ных вод
надмерзлотных	таликов на нам	мывной	территори	и г. Як	сутска		292
Светлаков А.А	, Пеллинен 1	B.A. Tep	мический	режим	и многоле	етнемерзлых	к грунтов
Окинского плос	когорья Восто	чного С	аяна (на пр	римере	е долины	р. Сенца)	297
Тугарина М	<b>І.А.</b> Структ	гурно-ги	дрогеолог	ически	ие осо	бенности	рудных
месторождений	в районах рас	спростра	нения мно	голеті	немерзлы	х пород (на	примере
месторождения	Иракинда, Рес	спублика	а Бурятия).				300
Фёдорова С.В.,	, Павлова Н.А	. Особе	нности рас	спреде.	ления ли	гия в подмеј	эзлотных
водах централы	ной Якутии						304
Шепелёв В.В. (	) водообменно	ой роли і	криолитозо	оны			308
	IV. ГИДРОГЕ	ЕОЛОГІ	ия нефт	ЕГА3	овых о	БЛАСТЕЙ	
Вахромеев А.Г	., Сверкунов	<b>C.A.</b> , <i>A</i>	кчурин Р	Х., И	[ваниши]	н В.М., Руж	сич В.В.,
Ташкевич И.В.	., Лисицин М.	<b>В.</b> Инно	вационны	е реше	ения в стр	оительстве :	глубоких
скважин на пре	омышленные	рассолы	, нефть и	газ в	деформі	ируемых тр	ещинных
коллекторах							
Вашурина М.І	З., Русакова	Ю.О.,	Храмцова	А.Л.	Макроко	омпонентны	й состав
пресных подзем	ных вод в есте	ественно	м и наруш	енном	гостояні	ии на террит	ории
Вартовского нес							
Волкова Н.А.	, Иванова	И.С., ч	Іуйкина	Д.И.,	Король	<b>И.С.</b> Сод	цержание
полициклически	их ароматичес	ских уг	леводород	ов в	воде и	донных отл	ожениях
оз. Кирилл-Выс	лор (ХМАО, Р	оссия)					321
Диденков Ю.Н							
В.А., Проскуря							
возобновляемых				•	-		
Казак Е.С., Ка							
пород баженовс							
Катаев В.Н., Е	-	-				•	ассивов в 336
районах нефтед							• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
Курчиков А.Р.							
Карабашской зо	ны Западно-С	ибирско	го бассейн	ıa			JT1
Литвинова И.	В., Сурнин А	<b>.И.</b> Гид	родинами	ческие	условия	в осадочно	ом чехле
Курейской сине							
Наливайко Н.І	Г., Гостева И.	А., Нові	иков Д.А.,	Черн	ых А.В. 1	Микробиоло	гические
и гидрогеохими							-
месторождений							
Новиков Д.А.,	Пыряев А.І	Н., Дулі	ьцев Ф.Ф	., Чер	оных А.1	В., Туровск	сая Е.М.
Первые резуль							
неокомских	отложений	Севе	ро-Уренго:	йского	неф неф	тегазоконде	нсатного
месторождения	<u> </u>	<u></u>					355
Плавник А.Г.	, Курчиков	A.P., I	Іцкович	M.B.,	Астафь	<b>ев В.П.</b> М	етоды и
результаты мо	делирования	гидроге	еохимичес	ких у	словий/	Западно-Си	бирского
осадочного басс	ейна						360
Рыжкова С.В.	К вопросу	о роли	элизионн	ного в	водообме	на в формі	ировании
месторождений							
Сурнин А.И.,							
Проведение оп							
подземных вод							

Теняков Е.О., Белкин И.Ю., Данилова М.А. Основные результаты переоценки	
запасов подземных вод Верхнечонского месторождения по промышленной	
категории для целей поддержания пластового давления	374
Черенева В.А. Структурно-гидрогеологические неоднородности областей	
нефтегазообразования юго-восточной окраины Сибирской платформы	379
V. НОВЫЕ МЕТОДЫ В ГИДРОГЕОДИНАМИКЕ И ГИДРОГЕОХИМИИ	
Аузина Л.И., Ланкин Ю.К. Особенности проведения опытно-фильтрационных	
исследований в районах развития пластов с двойной пористостью	384
Болдина С.В. Гидрогеодинамические эффекты землетрясений: экспериментальные	
данные и модели	389
Гаев А.Я., Куделина И.В., Алферов И.Н., Килин Ю.А. О гидрогеодинамике	
планеты и региона (на примере Урала и Предуралья)	394
Дульцев Ф.Ф., Новиков Д.А., Максимова А.А., Деркачев А.С., Черных А.В.	
Гидрогеохимия Новобибеевского проявления радоновых вод	400
Дутова Е.М., Кузеванов К.И., Никитенков А.Н., Покровский В.Д. Опыт	
использования технологий цифрового моделирования рельефа для решения	
многоцелевых гидрогеологических задач	405
Казанцева А.С. Применение методов изотопного анализа в гидрогеологических	
исследованиях на территории Пермского края	410
Копылова Г.Н. О проявлениях гидрогеологических предвестников землетрясений	
и извержений вулканов по данным наблюдений в скважинах Петропавловск-	
Камчатского полигона, полуостров Камчатка	415
Кузьмичёв Б.В., Кураничева А.И. Разведка Китойского месторождения	
подземных вод с использованием метода электротомографии	419
Озёрский А. Ю. О применении метода атомно-эмиссионной спектрометрии с	
индуктивно связанной плазмой в гидрохимических исследованиях	423
Оцимик А.А., Токарева О.В., Ильин А.И., Буддо И.В., Лапаев В.А., Белыш А.В.,	
Бощенко А.Н. Картирование водонасыщенных горизонтов-коллекторов на	
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных	
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	427
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	427
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	427
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ.  Поляков А.Ю., Кирюхин А.В., Журавлев Н.Б. Динамика поступления магматического газа в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар (Камчатка).  Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Использование данных дистанционного зондирования земли для создания геофильтрационных моделей территорий с расчлененным рельефом.  Хаустов А.П., Редина М.М. Полициклические ароматические углеводороды как маркер процессов в подземной гидросфере.  Хващевская А.А., Копылова Ю.Г., Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Деркачев А.С., Редин А.А. Изотопно-геохимические особенности	430
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430 434 439 444
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ.  Поляков А.Ю., Кирюхин А.В., Журавлев Н.Б. Динамика поступления магматического газа в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар (Камчатка).  Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Использование данных дистанционного зондирования земли для создания геофильтрационных моделей территорий с расчлененным рельефом.  Хаустов А.П., Редина М.М. Полициклические ароматические углеводороды как маркер процессов в подземной гидросфере.  Хващевская А.А., Копылова Ю.Г., Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Деркачев А.С., Редин А.А. Изотопно-геохимические особенности	430 434 439 444
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430 434 439 444
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ.  Поляков А.Ю., Кирюхин А.В., Журавлев Н.Б. Динамика поступления магматического газа в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар (Камчатка).  Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Использование данных дистанционного зондирования земли для создания геофильтрационных моделей территорий с расчлененным рельефом.  Хаустов А.П., Редина М.М. Полициклические ароматические углеводороды как маркер процессов в подземной гидросфере.  Хващевская А.А., Копылова Ю.Г., Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Деркачев А.С., Редин А.А. Изотопно-геохимические особенности Белокурихинского месторождения минеральных радоновых вод.  VI. ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. СОСТОЯНИЕ И КОНТРОЛІ	430 434 439 444
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ.  Поляков А.Ю., Кирюхин А.В., Журавлев Н.Б. Динамика поступления магматического газа в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар (Камчатка).  Рыбников П.А., Смирнов А.Ю. Использование данных дистанционного зондирования земли для создания геофильтрационных моделей территорий с расчлененным рельефом.  Хаустов А.П., Редина М.М. Полициклические ароматические углеводороды как маркер процессов в подземной гидросфере.  Хващевская А.А., Копылова Ю.Г., Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Деркачев А.С., Редин А.А. Изотопно-геохимические особенности Белокурихинского месторождения минеральных радоновых вод.  VI. ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. СОСТОЯНИЕ И КОНТРОЛІ Абукова Л.А., Абрамова О.П., Филиппова Д.С., Сафарова Е.А. Возможные гидрогеохимические эффекты в терригенных резервуарах подземного хранения водорода с метаном.	430 434 439 444
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430 434 439 444 <b>b</b>
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430 434 439 444 <b>b</b>
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430 434 439 444 <b>b</b>
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430 434 439 444 <b>b</b>
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430 434 439 444 <b>b</b>
территории Республики Саха (Якутия) методом малоглубинных электромагнитных зондирований мЗСБ	430 434 439 444 <b>b</b>

Деменев А.Д., Максимович Н.Г., Хмурчик В.Т., Роговский Г.М., Биктимиров	
А.В. Очистка подземных вод при дозированной подаче кислорода и применении	
биотехнологических методов	53
Замана Л.В., Усманов М.Т., Борзенко С.В., Федоров И.А., Усманова Л.И.,	
Аскаров Ш.А., Цыренжапов С.В. Гидрогеологические условия и источники	
подтопления летного поля читинского аэропорта «Кадала»	56
Зелинская Е.В., Первойкин М.В. Подземные воды как природно-техногенный	
pecypc	71
Кирюхин А.В., Воронин П.О., Журавлев Н.Б., Копылова Г.Н. Водно-метановые	
геотермальные резервуары в юго-западном предгорье Корякского вулкана,	
Камчатка	74
Кононов А.М., Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Шолохов П.А.	
Гидрогеологические аспекты цифрового мониторинга и прогнозирования	
экологической обстановки Байкальской природной территории	79
Король И.С., Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Органические микропримеси в	
высокоминерализованных подземных водах угольных отложений	33
Кузеванов К.К., Кузеванов К.И., Дутова Е.М., Вологдина И.В. Изменение	
качества подземных вод в результате эксплуатации месторождений севера Томской	
области (на примере Стрежевского месторождения) 48	39
Кулаков В.В. Гидрогеологическая стратификация разреза и качество субмаринных	
подземных вод Охотоморского региона	<del>)</del> 4
Куприянов Е.А. Влияние термореагентной обработки на производительность	
водозаборных скважин Томского водозабора	99
Курчиков Д. А., Плавник А. Г., Павленко О. Л. Глубинное захоронение	
пульпообразных буровых отходов: интерпретация материалов полного цикла	
работы скважины от опытных закачек до консервации объекта	)3
Ланкин Ю.К., Наумова О.О. Проблемы подтопления населенных пунктов	
<b>Иркутской области</b>	)8
Максимович Н.Г., Березина О.А., Деменев А.Д., Мещерякова О.Ю., Хмурчик	
В.Т. Примение комплексного подхода для изучения негативного влияния	
горнодобывающей промышленности на речные системы	13
Неуважаев Г.Д., Озёрский Д.А., Расторгуев А.В., Пленкин А.В., Григорьев Ф.В.	
Проблемы гидрогеологического моделирования в слабопроницаемых породах (на	
примере участка размещения подземной исследовательской лаборатории в	
Красноярском крае)	16
Озёрский А. Ю., Иванова Т. П. Фтор в подземных водах юрских отложений юго-	
востока Западно-Сибирского бассейна	2.1
Павленко О.Л., Боровская Т.А. Правовые пробелы в законодательстве о недрах	
при глубинной закачке буровых отходов и стоков	7
Попов В.Н. Гидрогеологическое обоснование размещения полигонов для	- /
складирования и утилизации твердых и жидких бытовых отходов в Ольхонском	
районе	27
1	) _
Рыбникова Л.С., Наволокина В.Ю. Оценка состояния гидросферы природно-	
технических систем с использованием данных геоинформационного мониторинга	2 4
(на примере бассейна р. Тагил, Средний Урал)	)4
Рященко Т.Г., Маслов Е.А. Инженерная геология месторождений твердых	• ^
полезных ископаемых (состояние проблемы и опыт изучения скальных грунтов) 53	39
Сотникова Е.Е., Дутова Е.М., Кузеванов К.И., Щербак Н.Г. Оценка	
эффективности работы водопонижающей штольни Лагерного сада (г. Томск) 54	13
Тагильцев С.Н., Тагильцев В.С., Болотнова Л.А., Сурганов С.В. Анализ	
гидрогеомеханической структуры породного массива на учебном полигоне	
	47

Черных А.В., Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Хващевская А.А., Ничкова Л.А.,	
Сигора Г.А., Хоменко Т.Ю., Яхин Т.А. Качество природных вод Севастопольской	
городской агломерации	552
Чечель Л.П. Техногенная трансформация химического состава вод в районах	
переработки Рb-Zn руд (Восточное Забайкалье)	557
Шолохов П.А. Аспекты использования подземных вод юрских угленосных	
отложений в качестве источника водоснабжения (на примере г. Иркутска)	562
Яковлев Д.В., Петров В.В., Табачук А.А. Результаты мониторинга по скважине	
№ 103а (термальный курорт «Загза», оз. Байкал)	566
Яковлев Д.В., Петров В.В., Табачук А.А. Результаты мониторинга по скважине	
№ 25-134 (пос. Танхой, оз. Байкал)	571
Янников А.М. Проблемы развития системы обратной закачки в пределах	
Малоботуобинского алмазоносного района	576
VII. МОЛОДЕЖНАЯ СЕКЦИЯ «НОВОЕ В ГИДРОГЕОЛОГИИ И НЖЕНЕРНО	ЙС
ГЕОЛОГИИ»	
Вавилов С.А., Поезжаев О.С., Минова Е.Н. Применение электротомографии для	
поисков межмерзлотных вод в Западной Якутии	580
Василевский П.Ю. Оценка взаимосвязи поверхностных и подземных вод в	
условиях аридного климата с помощью региональной геогидрологической модели	584
Дмитриев-Добровольский В.Е., Бадминов П.С. Особенности формирования и	
распределения подземного стока центральной части Восточного Саяна	589
Кураничева А.И., Ланкин Ю.К. Обзор результатов уточнения гидрогеологических	
параметров и качества пресных подземных вод Китойского месторождения	
(Иркутская область)	594
Авторский указатель	596

#### Научное издание

#### Подземная гидросфера

Материалы XXIII Всероссийского совещания по подземным водам востока России с международным участием

Утверждено к печати Ученым советом ИЗК СО РАН (протокол № 6 от 20.05.2021 г.)

Фото на обложке (автор Л.П. Алексеева): лицевая сторона: Источник термальных вод Хойто-Гол (Восточные Саяны) оборотная сторона: Утро на западном побережье оз. Байкал

Литературные редакторы *Н.Г. Балукова*, *Е.А. Балукова* Технические редакторы *Л.П. Алексеева и А.А. Светлаков* Компьютерная верстка *Л.П. Алексеевой* 

Подписано к печати 20.05.2021. Формат 60x84/8. Гарнитура «Таймс». Печать RISO. Усл. печ. л. 75.5. Тираж 100. Заказ № 165. Отпечатано в Институте земной коры СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128.