



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ФГБУН ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ

ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

PROCEEDINGS

of All-Russian Scientific Conference
with International Participation

«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology»
(Geothermal Volcanology Workshop 2020)

Conference was supported by RFBR grant 18-05-00052-20

**Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky
September 3 – 8, 2020**



ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ

2020



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФГБУН Институт вулканологии и сейсмологии
Дальневосточное отделение
Российская академия наук

**Всероссийская научная конференция
с международным участием
«Геотермальная вулканология, гидрогеология,
геология нефти и газа»
(Geothermal Volcanology Workshop 2020)**

3 – 8 сентября 2020 г.

Конференция проведена при поддержке РФФИ по проекту 18-05-00052-20

Материалы конференции



ПЕТРОПАВЛОВСК-КАМЧАТСКИЙ

2020

УДК 550.36+551.21+553.6+556.3

Научное издание

Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2020), 3 – 8 September, 2020 – Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 2020. – 180 p.

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. – 180 с.

ISBN 978-5-902424-33-8

This Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2020) was held in Petropavlovsk-Kamchatsky in 2020 by Institute of Volcanology & Seismology FEB RAS. The results of geothermofluidmechanics studies of the volcanic, hydrothermal & hydrocarbon systems are presented.

В сборнике представлены материалы всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2020), проведенной Институтом вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в 2020 г. Освещаются результаты исследований геотермофлюидомеханики вулканических, гидротермальных и углеводородных систем.

Утверждено к печати
Ученым советом
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Редакционная коллегия:
д.г.-м.н. А.В. Кирюхин, д.г.-м.н. Г.Н. Копылова, проф. Дж. Айкельбергер

Отв. редактор:
д.г.-м.н. А.В. Кирюхин

Ответственные секретари:
О.А. Гололобова, Е.В. Черных

ISBN 978-5-902424-33-8

© ИВиС ДВО РАН, 2020

Table of Contents

CHAPTER I. MAGMA-HYDROTHERMAL SYSTEMS

John C. Eichelberger

Insights on magma-hydrothermal systems from drilling at Krafla Caldera, Iceland 11

Alexei Yu. Ozerov

Gas-hydrodynamic regime of Klyuchevskoy volcano 15

Victor M. Sugrobov

About the works of V.V. Averyev and S.A. Fedotov on the study of hydrothermal systems and magma chambers for the development of geothermal energy in Kamchatka (memory) 20

Alexey Kiryukhin

Magma fracking and hydrothermal systems beneath active volcanoes..... 27

CHAPTER II. HYDROTHERMAL SYSTEMS IN VOLCANIC AREAS

Vassily Yu. Lavrushin, Altyn Aydarkozhina, Olga Ye. Kikvadze

Geothermal and geochemical features of mineral waters of the Elbrus and Kazbek volcanic regions of the Greater Caucasus 32

Larisa A. Vorozheykina, Natalia P. Asaulova, Natalia V. Obora

On the formation of the gas and chemical composition of nitrogen baths of the Paratunsky field..... 36

Ekaterina Baranovskaya, Natalia Kharitonova, Elena Fillimonova, Alexey Maslov, Anna Korzun, Elena Maximova, Natalia Muromets

Chemical and Isotopic Composition of Mineral Waters of Essentuki Mineral Waters Field 40

Larisa A. Lyamina, Alexandr V. Rastorguev, Rostislav S. Shtengelov, Natalia A. Kharitonova

Hydrodynamic model of nitrogen thermal water formation in crystalline massifs on the example of Kuldur spa 44

Nikita B. Zhuravlev

TOUGH2-modeling of the water recharge conditions for the Paratunsky geothermal field..... 48

Vladimir Kompanichenko

Hydrothermal systems of Kamchatka as an analogue of the prebiological environment in the early Earth..... 52

Yuri D. Kuzmin

Complex observations on the Verkhne-Paratunskaya hydrothermal system (Kamchatka) 56

CHAPTER III. SEISMICITY IN GEOFLUID VOLCANIC AND HYDROTHERMAL SYSTEMS WITH ACTIVE FAULTS

Alexey V. Solomatin

Application of the Fluid-Geomechanical Model for the Source of the 11-3-2011 Tohoku Catastrophic Earthquake..... 60

Pavel O. Voronin, Galina N. Kopylova

TOUGH2-EWASG modeling of water level changes in well E-1 (Elizovsky district, Kamchatka peninsula) 63

Mikhail V. Lemzikov

Estimations of the energy attenuations of the seismic waves at near distances from Kizimen volcano 67

Aida R. Kurmangaliyeva

Seismicity factor influence mechanism on the regime of nitrogen alkaline thermal waters of crack-core systems in the Northern Tien Shan 71

Dzhumagul Zh. Kendirbayeva

New data on the features of the gas-chemical composition and temperature of thermal waters of the Kyrgyz Tien Shan (on the example of the thermal mineral waters of Jety-Oguz) 75

CHAPTER IV. MAGMATIC FEEDING SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES

Yasuhisa Tajima, Setsuya Nakada, Fukashi Maeno, Toshio Huruzono, Masaaki Takahashi, Akihiko Inamura, Takeshi Matsushima, Masashi Nagai and Jun Funasaki

Shallow magmatic hydrothermal eruption in April, 2018 on Ebinokogen-Ioyama volcano in Kirishimavolcano group, Kyushu, Japan 79

Arthur Jolly, Corentin Caudron, Társilo Girona, Bruce Christenson, Roberto Carniel

Silent dome emplacement into a wet volcano: White Island (Whakaari), New Zealand 2012 83

Galina Kopylova, Svetlana Boldina

Groundwater Pressure Changes Due to Magmatic Activation: Case Study of The E-1 Well, Kamchatka Peninsula, Russia 87

Andrey Yu. Polyakov

Remote monitoring of the dynamics of the flow of magmatic gas into the geothermal reservoir based on the HOB0 RX 3000 station 90

Evgenia V. Chernykh

TOUGH-2 modeling thermal-hydrodynamic conditions of the Avachinsky volcano cone 94

Elena P. Kayukova

Isotopic composition of fluid phase of the mud volcanoes (the Kerch Peninsula, Eastern Crimea) 98

Vladimir A Semchev

Geothermal and Water Energy – in the Economy of Kamchatka (RUSSIA) 102

Tatyana V. Rychkova, Olga O. Usacheva

Modeling the conditions of functioning of geysers under the influence of Podrudnoy Lake-2 (Kronotsky Reserve, Kamchatka) 106

Mariia Wilkina

Theis Solution in Two-Phase Conditions 110

Polina V. Kochetkova

Reproduction of a basic scenario for the formation of a geothermal field 113

CHAPTER V. MODELING THE NATURAL STATE AND EXPLOITATION OF GEOTHERMAL RESERVOIRS, APPLICATIONS TO RESERVES ESTIMATION, FEASIBILITY STUDY AND INVESTMENT

Olga O. Usacheva, Tatyana V. Rychkova

Evaluating the effectiveness of directional drilling of new wells at the Mutnovsky geothermal field..... 116

Larisa A. Vorozheykina

Paratunka Depression – a superbasin of thermal waters 120

Kianoosh Moeini, Wei Yan, William G. Harrar

Geothermal energy production and heat storage potential of Frederikshavn formation 132

CHAPTER VI. RELATIONSHIPS AMONG GEOTHERMAL ENERGY, MAGMATISM, METALLOGENY, SECONDARY MINERALIZATION AND PERMEABILITY

Diana Mindaleva, Masaoki Uno, Atsushi Okamoto and Noriyoshi Tsuchiya

Fluid Infiltration and Permeability Evolution by Crustal Fracturing
during High Grade Metamorphism 136

CHAPTER VII. PRODUCTION GEOTHERMAL RESERVOIRS AND HARD-TO-RECOVER HYDROCARBON FORMATION CONDITIONS

Andrei I. Cheban, Pavel P. Golub, Rodion O. Rykov, Ivan S. Schakhmatov

The Effect of Binary Mixtures on the Reservoir Properties of Terrigenous Rocks 139

Larisa N. Boldushevskaya, Vladimir A. Kolesnikov, Maxim A. Bulgakov

Hydrothermal processes in the Neogene rocks of the southeastern coast of Kamchatka
according to microscopic studies in connection with the prospects for oil and gas potential
(on the example of areas of Cape Sopochny, Cape Piratkov, Utashud Island) 143

Alexey V. Tudvachev, Pavel K. Konosavsky, Svetlana A. Pereverzeva, Viatcheslav V. Tikhomirov

Assessment of the Possibility of Disposal Carbon Dioxide in North Stavropol UGS 147

Irina V. Litvinova, Aleksej I. Surnin, Natal'ya A. Ivanova

Hydrothermal stage in the formation of the hydrodynamic system of the sedimentary cover
of the Siberian platform 151

Ivan Delemen

Geological, geophysical and morphostructural preconditions for the prospecting of new
hydrocarbon and molecular hydrogen resources in the deep horizons
of the Kuril-Kamchatka island arc and the West Siberian plate: a comparative analysis experience 154

Valery A. Poturay

Organic Matter and Molecular Weight Distribution of Alkanes in Hydrothermal Systems of Kamchatka ... 158

Mikhail Puzyk, Elena Kayukova, Victoria Matyunina

Salt lakes and mud volcanoes of the Crimea as objects of scientific research
in the course of field practice of students of St. Petersburg state University 162

Aynur S. Bayramova

TOUGH2 modeling of complex-built reservoir of the Metejan water-methane field 166

CHAPTER VIII. MECHANISM OF GEYSERS AND OTHER CYCLIC PHENOMENA IN HYDROTHERMAL SYSTEMS

Anastasiya V. Sergeeva, Alexey V. Kiryukhin, Tatiana V. Rychkova

The Role of Bicarbonate and pH of Solutions in the Eruption of the Shaman Geyser
(Kamchatka, Russia)..... 170

Gennady A. Karpov

Surface indicators of activation of the deep feeding zone of modern caldera hydrothermal systems 173

Valeriy V. Kulakov

Biogeochemical Processes of Mineral Formation in the Preparation of Drinking Water in the Aquifer 176

Содержание

РАЗДЕЛ I. МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

| | |
|--|----|
| <i>Айкельбергер Джон Ч.</i> Научные данные о магмо-гидротермальных системах, полученные в результате бурения в кальдере Крабла, Исландия | 11 |
| <i>Озеров А.Ю.</i> Газогидродинамический режим Ключевского вулкана | 16 |
| <i>Сугробов В.М.</i> О работах В.В. Аверьева и С.А. Федотова по изучению гидротермальных систем и магматических очагов для развития геотермальной энергетики Камчатки (воспоминание)..... | 20 |
| <i>Кирюхин А.В.</i> Магматический фракинг и гидротермальные системы под активными вулканами..... | 27 |

РАЗДЕЛ II. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

| | |
|--|----|
| <i>Лаврушин В.Ю., Айдаркожина А., Киквадзе О.Е.</i> Геотермические и геохимические особенности минеральных вод Эльбрусской и Казбекской вулканических областей Большого Кавказа | 32 |
| <i>Ворожейкина Л.А., Асаулова Н.П., Обора Н.В.</i> О формировании газового и химического состава азотных терм Паратунского месторождения | 37 |
| <i>Барановская Е.И., Харитонова Н.А., Филимонова Е.А., Маслов А.А., Корзун А.В., Максимова Е.С., Муромец Н.Н.</i> Химический и изотопный состав минеральных вод месторождения Эссентуки | 41 |
| <i>Лямина Л.А., Расторгуев А.В., Штенгелов Р.С., Харитонова Н.А.</i> Гидродинамическая модель формирования азотных термальных вод в кристаллических массивах на примере месторождения Кульдур | 44 |
| <i>Журавлев Н.Б.</i> TOUGH2-моделирование условий водного питания Паратунского геотермального месторождения | 48 |
| <i>Компаниченко В.Н.</i> Гидротермальные системы Камчатки как аналог предбиологической среды на ранней Земле | 52 |
| <i>Кузьмин Ю.Д.</i> Комплексные наблюдения на Верхне-Паратунской гидротермальной системе (Камчатка)... | 56 |

РАЗДЕЛ III. СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛЮИДНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С АКТИВНЫМИ РАЗЛОМАМИ

| | |
|--|----|
| <i>Соломатин А.В.</i> Приложение геофлюидомеханической модели к очагу катастрофического землетрясения Тохоку 11.III 2011 г. | 60 |
| <i>Воронин П.О., Копылова Г.Н.</i> TOUGH2-EWASG моделирование изменения уровня воды в скважине Е-1 (Елизовский район, полуостров Камчатка)..... | 63 |
| <i>Лемзиков М.В.</i> Оценка поглощения энергии сейсмических волн на близких расстояниях от вулкана Кизимен | 67 |
| <i>Курмангалиева А.Р.</i> Механизм влияния фактора сейсмичности на режим азотных щелочных терм трещинно-жильных систем Северного Тянь-Шаня | 71 |
| <i>Кендирбаева Дж.Ж.</i> Новые данные об особенностях газо-химического состава и температуры термальных вод Кыргызского Тянь-Шаня (на примере термоминеральных вод Джеты-Огуз)..... | 75 |

РАЗДЕЛ IV. МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

| | |
|--|-----|
| <i>Ясухиса Таджима, Сэцуя Накада, Фукаши Маэно, Тошио Хурузоно, Масааки Такахаси, Акихико Инамура, Такеши Мацусима, Масаси Нагаи и Дзюн Фунасаки</i> Малоглубинное магматическое гидротермальное извержение апреля 2018 года на вулкане Эбинокоген-Иояма, группы вулкана Кирисима, острова Кюсю, Япония | 79 |
| <i>Джолли Артур, Кодрон Корентин, Жирона Тарсило, Кристенсон Брюс, Карниэль Роберто</i> «Бесшумная» выжимка купола в водонасыщенный вулкан: остров Уайт (Вакаари), Новая Зеландия | 83 |
| <i>Копылова Г.Н., Болдина С.В.</i> Изменения давления подземных вод при магматической активизации: на примере скважины Е-1, полуостров Камчатка, Россия | 87 |
| <i>Поляков А.Ю.</i> Удаленный мониторинг динамики поступления магматического газа в геотермальный резервуар на базе станции НОВО RX 3000..... | 90 |
| <i>Черных Е.В.</i> TOUGH2 моделирование термогидродинамического состояния конуса Авачинского вулкана | 94 |
| <i>Каюкова Е.П.</i> Изотопный состав жидкой фазы грязевых вулканов (Керченский полуостров, Восточный Крым)..... | 98 |
| <i>Семчев В.А.</i> Геотермальная энергия и энергия воды – в экономике Камчатки | 102 |

| | |
|---|-----|
| <i>Рычкова Т.В., Усачева О.О.</i> | |
| Моделирование условий функционирования гейзеров под воздействием Подпрудного озера-2 (Кроноцкий заповедник, Камчатка) | 106 |
| <i>Вилькина М.В.</i> | |
| Задача Тейса в двухфазной постановке | 110 |
| <i>Кочеткова П.В.</i> | |
| Воспроизведение базового сценария формирования геотермального месторождения..... | 113 |

РАЗДЕЛ V. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО РЕЖИМА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ И ПОДГОТОВКИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ

| | |
|--|-----|
| <i>Усачева О.О., Рычкова Т.В.</i> | |
| Направленное бурение новых скважин на Мутновском геотермальном месторождении и оценка его эффективности..... | 116 |
| <i>Ворожейкина Л.А.</i> | |
| Паратунская впадина – супербассейн термальных вод..... | 120 |
| <i>Моейни К., Ян В., Харрар У.Г.</i> | |
| Потенциал производства геотермальной энергии и аккумулирования тепла свиты Фредериксхавн..... | 132 |

РАЗДЕЛ VI. ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, МАГМАТИЗМА, МЕТАЛЛОГЕНИИ, ВТОРИЧНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ И ПРОНИЦАЕМОСТИ

| | |
|---|-----|
| <i>Миндалева Диана, Уно Масаоки, Окамото Ацуши, Цучия Нориеси</i> | |
| Инфильтрация флюидов и эволюция проницаемости при фракинге литосферы в процессе метаморфизма..... | 136 |

РАЗДЕЛ VII. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ЗАПАСАМИ

| | |
|---|-----|
| <i>Чебан А.И., Голуб П.П., Рыков Р.О., Шахматов И.С.</i> | |
| Влияние бинарных смесей на ФЕС терригенных пород..... | 139 |
| <i>Болдушевская Л.Н., Колесников В.А., Булгаков М.А.</i> | |
| Проявления гидротермальных процессов в неогеновых породах юго-восточного побережья Камчатки по данным микроскопических исследований и в связи с перспективами нефтегазоносности (на примере участков мыса Сопочного, мыса Пираткова, о-ва Уташуд) | 143 |
| <i>Тудвачев А.В., Коносовский П.К., Переверзева С.А., Тихомиров В.В.</i> | |
| Оценка возможности захоронения углекислого газа в Северо-Ставропольском ПХГ | 147 |
| <i>Сурнин А.И., Литвинова И.В., Иванова Н.А.</i> | |

| | |
|--|-----|
| Гидротермальный этап в формировании гидродинамической системы осадочного чехла Сибирской платформы | 151 |
|--|-----|

Делемень И.Ф.

| | |
|--|-----|
| Геолого-геофизические и морфоструктурные предпосылки поиска новых ресурсов углеводородов и молекулярного водорода на глубоких горизонтах Курило-Камчатской островной дуги и Западно-Сибирской плиты: опыт сравнительного анализа | 154 |
|--|-----|

Потурай В.А.

| | |
|---|-----|
| Органическое вещество и молекулярно-массовое распределение алканов в ряде гидротермальных систем Камчатки | 158 |
|---|-----|

Пузык М.В., Каюкова Е.П., Матюнина В.А.

| | |
|--|-----|
| Соляные озера и грязевые вулканы Крыма как объекты научных исследований в ходе полевых практик студентов СПбГУ | 162 |
|--|-----|

Байрамова А.С.

| | |
|--|-----|
| TOUGH2-моделирование сложно-построенного резервуара Метеджанского водно-метанового месторождения | 166 |
|--|-----|

РАЗДЕЛ VIII. МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ, ЦИКЛИЧЕСКИЕ И ДИАГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

Сергеева А.В., Кирюхин А.В., Рычкова Т.В.

| | |
|---|-----|
| Роль гидрокарбонат-иона и pH раствора в извержении гейзера Шаман (Камчатский Край, Россия)..... | 170 |
|---|-----|

Карпов Г.А.

| | |
|--|-----|
| Поверхностные индикаторы активизации зоны глубинного питания современных кальдерных гидротермальных систем | 173 |
|--|-----|

Кулаков В.В.

| | |
|---|-----|
| Биогеохимические процессы формирования минералов при подготовке питьевых вод в водоносном горизонте | 176 |
|---|-----|

CHAPTER I. MAGMA-HYDROTHERMAL SYSTEMS

РАЗДЕЛ I. МАГМО-ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 550.836

Insights on magma-hydrothermal systems from drilling at Krafla Caldera, Iceland

John C. Eichelberger

*International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, AK 99775 USA
jceichelberger@alaska.edu*

Proximity to magma is required for geothermal reservoirs to be truly «renewable», not just places to mine old heat. It is therefore appropriate to think of a «magma-hydrothermal system» not as two separate entities but as a single system, as the meeting title «Geothermal Volcanology» implies. Geothermal drilling at Krafla Caldera, Iceland, suggests a system comprised of two, stacked convective regimes with a thin intervening conductive boundary. The upper regime is the hydrothermal zone, wherein an aqueous fluid convects by porous flow through a rock matrix containing energy as sensible heat. The lower regime is magma, which convects as a whole, contains vastly greater thermal energy released as latent heat by crystallization and as high-enthalpy fluid by degassing, and is frequently replenished with new magma. The thickness of the intervening conductive layer, the magma-hydrothermal boundary (MHB), provides dominant control on the rate of heat transfer from magmatic to hydrothermal regimes. The thermal gradient in MHB provides a measure of heat flow from magma into the hydrothermal reservoir. For Krafla, the heat flux is $\geq 24 \text{ W/m}^2$ and if applied over the inferred 3.5 km^2 area of the rhyolite magma body represents $\geq 100 \text{ MW}$, but comparable to sustained thermal power output of individual boreholes that reached magma. Breaching MHB may be the key to accessing the energy of magma.

Keywords: Magma, hydrothermal, geothermal, convection, conduction

Научные данные о магмо-гидротермальных системах, полученные в результате бурения в кальдере Крабла, Исландия

Джон Ч. Айкельбергер

*Международный центр по исследованию Арктики, Аляскинский университет в Фэрбенксе,
г. Фэрбенкс, АК99775 США
jceichelberger@alaska.edu*

Близость к магме необходима для того, чтобы геотермальные резервуары были по-настоящему «возобновляемыми», а не просто местами для добычи аккумулированного ранее тепла. Поэтому уместно думать о «магмо-гидротермальной системе» не как о двух отдельных сущностях, а как об одной системе, как предполагает название совещания «Геотермальная вулканология». Геотермальное бурение в Крафла-Кальдера, Исландия, предполагает наличие системы, состоящей из двух уложенных конвективных режимов с тонкой вмещающейся проводящей границей. Верхний режим представляет собой гидротермальную зону, в которой водный флюид конвектирует через матрицу породы, содержащую энергию в виде чувствительного тепла. Нижний режим – это магма, которая конвектирует в целом, содержит значительно большую тепловую энергию, высвобождаемую в виде латентного тепла при кристаллизации и в виде высокоэнтальпийного флюида при дегазации, и часто пополняется новой магмой. Толщина вмещающегося проводящего слоя – магма-гидротермальной границы (МНВ) – обеспечивает доминирующий контроль над скоростью передачи тепла из магматического в гидротермальный режим. Тепловой градиент в МНВ обеспечивает измерение теплового потока от магмы в гидротермальный коллектор. Для Крафлы тепловой поток составляет $>24 \text{ Вт/м}^2$ и при применении на предполагаемой площади $3,5 \text{ км}^2$ риолитового магматического тела составляет $>100 \text{ МВт}$, но сравним с постоянной тепловой мощностью отдельных скважин, достигших магмы. Прорыв МНВ может быть ключом к получению энергии магмы.

Ключевые слова: Магма, гидротермальный, геотермальный, конвекционный, проводимость

1. Introduction

Given the tremendous difference between the rate of heat transport by conduction through solid rock and advection of heat by aqueous fluid through permeable rock, the strong control of hydrothermal activity on magma evolution cannot be questioned. It is therefore surprising that relatively little has been written on this topic. The reason is likely a separation of communities of practice. Until now, no one has investigated magmatic systems directly. Rather, it is done with in the laboratory with microscale samples, or field-based with petrologic studies of «fossil» systems, remote (surface or supra-surface-based) sensing of active systems, and hydrodynamic modeling. In contrast, hydrothermal systems are the domain of fluid geochemistry and alteration mineralogy, reservoir modeling involving porous flow, and most importantly direct measurement of conditions and lithology from geothermal drilling, much of the data from which are proprietary. Now that geothermal drilling has accidentally hit magma at three geothermal fields, our geothermal and volcanological communities need engage with each other, as is the case of this workshop.

2. Drilling into molten rock

It may come as a surprise that molten rock can be drilled [1]. Normal drilling practice is to circulate fluid down the drill stem, through the drill bit, and back up the annulus to the surface. The cold fluid is mostly water, usually with some additives. It serves the purposes of keeping the drill bit and the rock cool and returning rock, brittlely fractured in making the hole, to the surface. These fragments are in the form of sand-like cuttings. However, if a core bit and receiving core barrel are used, samples are retrieved as cylinders of rock. Core is of greater use Given the tremendous difference between the rate of heat transport by conduction through solid rock and advection of heat by aqueous fluid through permeable rock, the strong control of hydrothermal activity on magma evolution cannot be questioned. It is therefore surprising that relatively little has been written on this topic. The reason is likely a separation of communities of practice. Until now, no one has investigated magmatic systems directly. Rather, it is done with in the laboratory with microscale samples, or field-based with petrologic studies of «fossil» systems, remote (surface or supra-surface-based) sensing of active systems, and hydrodynamic modeling. In contrast, hydrothermal systems are the domain of fluid geochemistry and alteration mineralogy, reservoir modeling involving porous flow, and most importantly direct measurement of conditions and lithology from geothermal drilling, much of the data from which are proprietary. Now that geothermal drilling has accidentally hit magma at three geothermal fields, our geothermal and volcanological communities need engage with each other, as is the case of this workshop.

Molten rock can be drilled if circulation is sufficiently fast and penetration sufficiently slow to quench melt to brittle drillable glass just ahead of the advancing drill bit. Magma, unerupted molten rock stored at depth, has never been cored but in principle it could be. The molten rock in the interiors of lava lakes have been cored many times for research purposes, most prominently at Kilauea Iki, Hawaii where lava erupted near the summit of Kilauea Volcano in 1959 and filled to a pit crater to a depth of 130 m. The shrinking melt lens was cored repeatedly during the next 3 decades [2].

3. The case of Kilauea Iki

The results from drilling Kilauea Iki have been influential in thinking about magma chambers at depth, particularly results pertaining to the transition from the hydrothermal zone of the solid lake crust to the melt-rich zone. The hydrothermal zone comprises basalt with fractures open to the surface and containing steam from vaporization of downward percolating rainwater. At the surface elevation of the lake of 1070 m, the boiling point is 96 °C and the temperature profile is isothermal at that temperature to the base of the open system. The downward transition from the brittle, fractured, crystalline hydrothermal regime to the molten regime is a thin conductive, linear temperature gradient zone that has moved downward with time. The hydrothermal zone expanded downward by cooling the crust and cracking it towards the retreating melt zone (Fig. 1A).

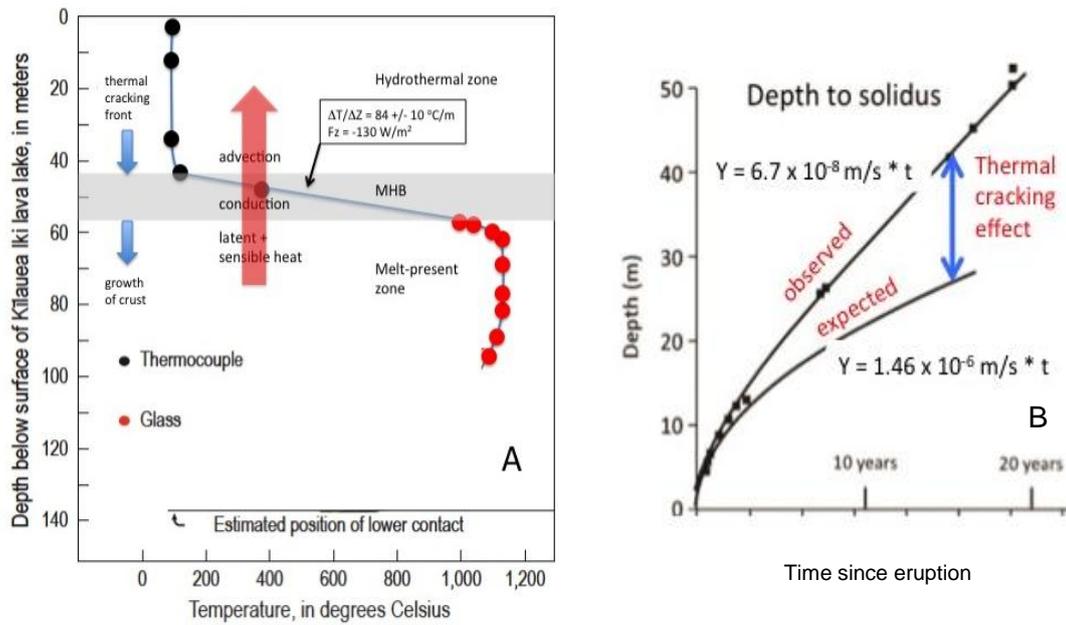


Figure 1 – (A) A temperature profile from the surface into the melt lens in Kilauea Iki, 1981 [3]. This is one of many obtained over three decades after formation of the lake in 1959. (B) Core hole data on growth of crust over two decades show the effect of thermal cracking compared to that of simple conduction [2]

The result is that cooling and crystallization are approximately constant so that crustal thickness grows linearly with time (Figure 1B) rather than growing at a rate proportional to \sqrt{t} . The latter would be the case if the crust were a thickening conductive zone, essentially a growing layer of insulation. But thermally, the magma-hydrothermal boundary (MHB) can be treated as a transition zone between two constant temperature surfaces, the upper bathed by hydrothermal fluid and the lower by melt-rich lava, producing a steady-state condition within the moving spatial coordinates of the zone [1]. The downward propagation of MHB is then a proxy for thermal power output of the system.

Using Fourier's Law to calculate heat flux from the temperature gradient yields 130 W/m^2 (total power output 14 MW). If this all comes from the latent heat of crystallization at the top of the molten zone then the crust should grow downward at 2.4 m/a, in accord with the observed value of 2.3 m/a (average over 1962 to 1981).

3. The case of Krafla

Figure 2 is a plausible 3-D rendering of Krafla, centered at 65.71°N and 16.75°W . The encounter with magma by drilling was not anticipated through geophysical surveys. However, it was later shown that the Krafla rhyolite magma body coincided with a strong V_p/V_s anomaly [4] and its top with a seismic reflector [5].

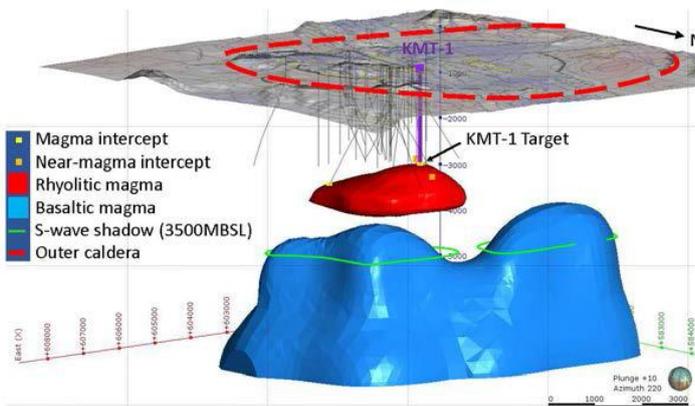
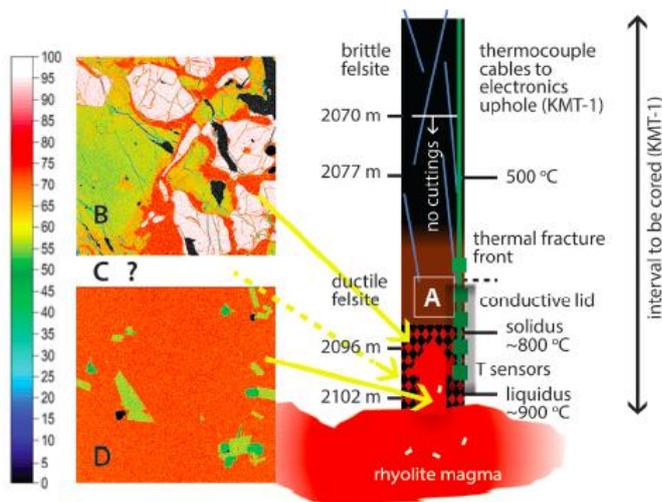


Figure 2 – Idealized configuration of rhyolitic magma body and deeper basaltic body, responsible for generating rhyolite by crustal melting, under Krafla Caldera (red dashed line). Light gray lines are existing wells drilled by Landsvirkjun. Heavy line is planned research well KMT-1. Credit: J.W. Catley

The site for Iceland Deep Drilling Project's first well, IDDP-1, was chosen to be near the center and hottest part of the caldera. It was designed to reach supercritical fluid at 4.5 km, but instead hit magma at 900 °C at 2.1 km. As the most prominent, although accidental, example of drilling encountering silicic magma, results were presented in a special issue of *Geothermics* (2014). Planning is underway to intentionally drill to and core through MHB to magma, as the first experiment of the Krafla Magma Testbed (KMT) described in GVW-2019.

The sparse data from IDDP-1 (Figure 3) implies a thermal gradient of at least 16 °C/m, yielding a heat flux of at least 24 W/m². Using the same approach as at Kilauea Iki lava lake, this implies a crystallization rate of 0.6 m/a, yet no crystallization is occurring at the top of the magma body. Instead, there is an abrupt transition at the roof from partially melted felsite to near-liquidus magma. The best way to explain this is that unlike Kilauea Iki, the magma is convecting, sweeping away crystallization products before they can attach to the roof, but delivering latent heat and high-enthalpy magmatic water to melt the felsite (Fig. 4).

Applying a viscosity model for magma of Krafla rhyolite's composition and temperature [6] yields $\eta = 3 \times 10^5$ Pa s. For conservative conditions, this gives a Rayleigh number $Ra_T = 3 \times 10^8$, whereas convection is expected for $Ra_T > 2 \times 10^3$. Note that as a consequence of vigorous convection, the MHB is actually migrating upward rather than downward, as in the case of a lava lake. Also, if the inferred heat flux is applied to the entire inferred area of the magma body, the total thermal power output is about 100 MW, whereas IDDP-1 produced more than that in a long (several months) flow test. A likely explanation is that drilling ruptured the MHB, allowing direct access of water to magma and/or release of supercritical water from magma. This may be the key to accessing magma energy, and with it an order of magnitude increase in power per well. Cooling 0.8 km³ of rhyolite from liquidus to solidus would yield 1 GW_T for 30 years, whereas the same cooling of rock would require 4.5 km³.



Color scale is wt.% SiO₂

Figure 3 – Inferred lithologies in IDDP-1 borehole and 1 mm × 1mm Si element maps of the only two lithologies represented in chips from the bottom of the well. A is ductile felsite (microcrystalline granite) within MHB, B is partially melted felsite, C is partially crystallized magma, which would be expected at the roof of the magma chamber but is not present, and D is near-liquidus rhyolite magma. MHB must extend from deeper than 2077 m to 2102 m. Photo credit: N. Graham and P. Izbekov at University of Alaska Fairbanks's Advanced Instrumentation Laboratory. Also shown are plans for KMT-1 to obtain continuous core (black double-headed arrow) and a temperature profile from a thermocouple string (green line) through the same interval

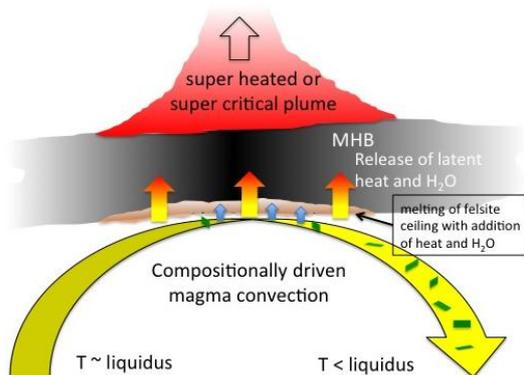


Figure 4 – Thermally (density increase due to cooling) and compositionally (density increase due to crystal growth) driven circulation in magma could transfer heat and H₂O at the lower face of the MHB without coating it with crystals and, in the case of Krafla, partially melting it

References

1. Hardee, H.C. Solidification in Kilauea Iki lava lake // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1980. 7. P. 211–223.
2. Barth, G.A., Kleinrock, M.C., and Helz, R.T. The magma body at Kilauea Iki lava lake: Potential insights into mid-ocean ridge magma chambers / G.A. Barth, M.C. Kleinrock, R.T. Helz // *J. Geophys. Res.* 1994. 99. P. 7199–7217.
3. Helz, R.T. Petrologic insights into basaltic volcanism at historically active Hawaiian volcanoes / R.T. Helz, D.A. Clague, T.W. Sisson, C.R. Thornber // *Professional Paper.* 2014. P. 237–292.
4. Schuler, J.; Greenfield, T.; White, R.S.; Roecker, S.W.; Brandsdóttir, B.; Stock, J.M.; Tarasewicz, J.; Martens, H.R.; Pugh, D. Seismic imaging of the shallow crust beneath the Krafla central volcano, NE Iceland / J. Schuler, T. Greenfield, R.S. White, S.W. Roecker, B. Brandsdóttir, J. M. Stock, J. Tarasewicz, H. R. Martens, D. J. Pugh // *Geophys. Res. [Solid Earth]*. 2015. 120. P. 7156–7173.
5. Kim, D. Magma reflection imaging in Krafla, Iceland, using microearthquake sources / D. Kim, L.D. Brown, K. Árnason, K. Ágústsson, H. J. Blanck // *Geophys. Res. [Solid Earth]*. 2017. 122. P. 5228–5242.
6. Dingwell D.B. The effect of water on the viscosity of a haplogranitic melt under PTX conditions relevant to silicic volcanism / D.B. Dingwell, C. Romano, K.-U. Hess // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. 124. P. 19–28.

УДК 551.1/4

Gas-hydrodynamic regime of Klyuchevskoy volcano

Alexei Yu. Ozerov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
ozarov@ozarov.ru*

Strombolian type of volcanic activity was chosen as the object of the present study as the most frequent phenomenon occurring at basalt volcanoes (Luchitskiy, 1971; Rittmann, 1960). Strombolian explosion is a powerful, sudden and usually unexpected event. Explosions occur during summit, adventive and lateral eruptions. Average basalt explosion ejects up to 30-50 tons of solid magmatic products onto the surface, whereas a strong one may bring 250-1000 tons.

Since an unambiguous conventional explanation of the causes of Strombolian explosions does not exist, we carried out a number of experimental studies that allowed us to better understand the mechanism of Strombolian activity. In 2002 we started performing laboratory experiments involving two-phase mixtures. Nine experimental facilities had been designed and constructed for five years. As the result, the author developed a Complex Apparatus for Modelling Basaltic Eruptions – CAMBE.

Present research is aimed at revealing the causes triggering the discrete regime of basaltic magma eruptions occurring as rhythmic explosions. Experimental studies considered the kinetics of two-phase gas-liquid mixtures in vertical tubes (from the moment of generation of first gas bubbles till the formation of stable gas structures). Resulting data were compared to the real volcanic processes and events.

Keywords: basaltic volcano, eruption, Strombolian explosions, mechanism, experimental facility, gas-hydrodynamics, explosion physics

Газогидродинамический режим Ключевского вулкана

А.Ю. Озеров

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Объектом исследований выбран наиболее часто встречающийся на базальтовых вулканах тип вулканической активности – стромболианский (Лучицкий, 1971; Rittmann, 1960). Стромболианский взрыв – это мощное, резкое и, как правило, неожиданное событие. Взрывы происходят в ходе вершинных, побочных и латеральных извержений. Средний по мощности базальтовый взрыв выбрасывает на поверхность 30-50 тонн твердых магматических продуктов, сильный 250-1000 тонн.

Поскольку нет однозначного универсального объяснения причин стромболианских взрывов, мы провели цикл экспериментальных исследований, которые позволили понять механизм стромболианской активности. В 2002 году были начаты лабораторные эксперименты с двухфазными смесями, за пять лет было сконструировано девять газогидродинамических экспериментальных установок. В результате автором создан Комплекс Аппаратуры Моделирования Базальтовых Извержений – КАМБИ.

Задача настоящих исследований – выявление причин возникновения дискретного режима извержения базальтовых магм в виде ритмических взрывов. Экспериментальные исследования включали изучение кинетики газожидкостных двухфазных смесей в вертикальных трубах (от момента зарождения первых газовых пузырьков до появления зрелых стабильных газовых структур) и сопоставление полученных данных с реальными вулканическими событиями.

Ключевые слова: базальтовый вулкан, извержение, стромболианские взрывы, механизм, экспериментальная установка, газогидродинамика, физика взрыва

Экспериментальные исследования

При создании установки мы стремились максимально учесть соотношения параметров реальных питающих магматических систем; за основу принят вулкан Ключевской (Камчатка) – типичный представитель базальтовых вулканов (Озеров и др., 1997). Кроме того, мы старались избежать любых возможных структурных, запирающих и энергетических барьеров, способных повлиять на характер движения вещества. Установка смонтирована в здании Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Общая высота КАМБИ – 18 метров. Установка состоит из двух систем – моделирующей и регистрирующей (Рис. 1). Поскольку КАМБИ создан для изучения вулканических процессов, поэтому для удобства последующего обсуждения результатов экспериментальных исследований названия составляющих модельной системы условно приближены к терминам вулканической системы.

Моделирующая система включает емкость для приготовления газонасыщенной модельной жидкости (магматический очаг), прозрачный шланг (питающий канал), аквариум для приема поступающей модельной жидкости (кратерную область/жерло) (Рис. 1). Описание магматической системы приводится снизу вверх.

В работе используется жидкость и два вида газа. В качестве жидкости применяется вода (H_2O). В качестве растворимого газа выбран углекислый газ (CO_2). Он хорошо растворяется в воде (в 1 литре H_2O при температуре эксперимента $20^\circ C$ и давлении 1 атм. растворяется – 828 мл CO_2), кроме того, этот газ достаточно легко переходит в свободную фазу. Газ азот (N_2) практически нерастворим в воде и используется в качестве поршня, выдавливающего модельную жидкость из бака. В результате предварительных опытов было установлено, что полный спектр проявления всех газогидродинамических режимов достигается при давлении газонасыщения – 1,6 атм.

Регистрирующая система включает систему динамического видеослежения, электронный высотомер и спидометр, блок видеорегистрации, блок акустической регистрации, синхронизирующее устройство и отключающую систему (Рис. 1).

В ходе экспериментов, при движении газонасыщенной жидкости по вертикальной колонне, изучалась перестройка структуры модельной жидкости. Описаны последовательно возникающие газогидродинамические режимы – жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный. Следует добавить, что любой из установленных газогидродинамических режимов, в зависимости от давления газонасыщения в баке, может быть выведен на поверхность – на верхний срез шланга, что позволяет моделировать разные типы вулканических извержений. Особое внимание уделено ранее неизвестному режиму, связывающему пузырьковый и снарядный режимы. Это новый, морфологически устойчивый газогидродинамический режим – кластерный режим.

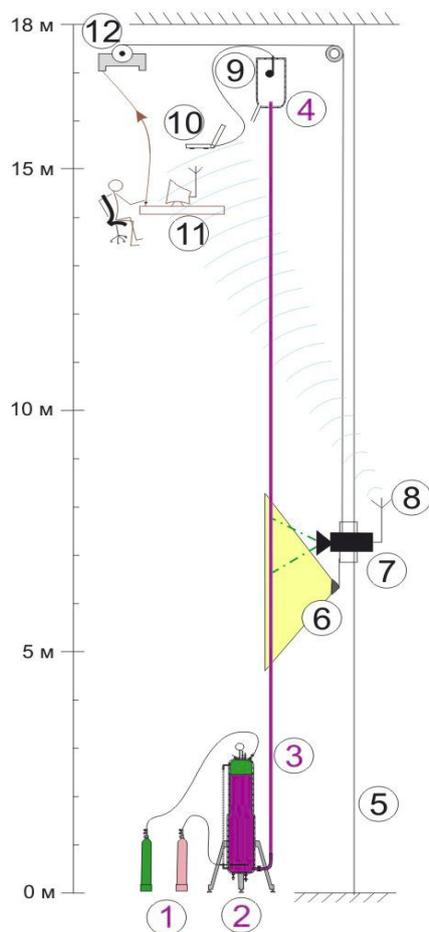


Рисунок 1 – Комплекс аппаратуры для моделирования базальтовых извержений – КАМБИ (моделирующая (1-4) и регистрирующая (5-12) системы).

1 – газовые баллоны высокого давления с CO₂ и N₂; 2 – герметичный бак для приготовления модельной жидкости; 3 – прозрачный шланг; 4 – аквариум для приема жидкости; 5 – трос, направляющий движение платформы динамического видеослежения; 6 – источник света; 7 – видеокамера; 8 – передатчик и телеметрическая антенна; 9 – микрофон; 10 – компьютер; 11 – приемник видеосигнала и монитор; 12 – электродвигатель. В верхней части рисунка – оператор управляющий движением камеры

Обсуждение результатов исследований

I. Результаты экспериментов на КАМБИ существенно дополняют известные газогидродинамические представления, на которых базируются вулканологические построения, связанные с динамикой движения базальтовых расплавов. Это связано с тем, что наши экспериментальные исследования характеризуются рядом особенностей, которые не принимались в расчет в ранее проводимых работах по гидродинамическому моделированию извержений:

1. Впервые была реализована модель, которая учитывала геометрические параметры питающего канала базальтового вулкана. Протяженность реальных вулканических каналов на несколько порядков больше их диаметра, поэтому на КАМБИ соотношение внутреннего диаметра канала к его высоте примерно 1:1000.

2. Впервые при физическом моделировании извержений были реализованы условия подъема газонасыщенной жидкости по колонне, что дало возможность наблюдать процесс нуклеации газовых пузырьков, их последующий рост, формирование кластеров и снарядов.

3. При проведении экспериментов была обеспечена возможность естественного подъема и выхода на поверхность модельной жидкости, исключены любые структурные барьеры и флуктуации скорости подачи газонасыщенной жидкости.

II. В экспериментах однофазная модельная жидкость в процессе подъема по колонне превращается в двухфазную систему, при этом последовательно (снизу вверх) реализуются четыре режима: жидкостной, пузырьковый, кластерный и снарядный (Рис. 2).

III. В результате экспериментальных исследований выявлено ранее неизвестное звено, связывающее пузырьковый и снарядный режимы. Мы предлагаем назвать его кластерным режимом (рис. 2, 13-й и 14-й метры). Это новый, морфологически устойчивый газогидродинамический режим. Описание этого режима мы не найдем в обобщающих монографиях (Кутателадзе и Накоряков, 1984, Prandtl-Fihrer durch die Stromungslehre, 2001;

Wallis, 1969) и в публикациях по моделированию работы нефтяных скважин на крупногабаритных установках (Сахаров и Мохов, 2004).

Приведем основные характеристики кластерного режима: 1 – главным элементом режима является пузырьковый кластер, представляющий собой объем жидкости с высокой концентрацией пузырьков, сверху и снизу ограниченный жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы; 2 – совокупность пузырьковых кластеров, следующих друг за другом на определенном расстоянии, создает кластерный режим; 3 – он всегда проявляется между пузырьковым и снарядным режимами; 4 – кластерные структуры на отдельных интервалах колонны имеют устойчивый, повторяющийся характер; 5 – морфологически выделяются кластеры двух видов – открытые и заблокированные; 6 – скорость подъема кластеров ниже, чем у зрелого пузырькового и снарядного режимов; 7 – продолжительность существования кластерного режима сопоставима со временем существования пузырькового и снарядного; 8 – кластерный режим возникает в широком диапазоне гидродинамических условий: в барботажной колонне (при нулевой скорости движения жидкости и без растворенного газа) и в движущейся газонасыщенной колонне (в интервале скоростей жидкости 1-10 см/с), 9 – механизм образования кластеров обусловлен взаимодействием крупных газовых структур со стенками канала, эффектами самозапираания и торможения.

Автор полагает, что кластерный режим присущ не только вулканическим процессам; его следует рассматривать более широко, как самостоятельный режим в физике газожидкостных смесей; например, на природных объектах (гидротермальные системы и грязевой вулканизм), при моделировании работы буровых скважин (гидротермальные и нефтяные) и в химической промышленности.

IV. Рассмотрим подробнее проявление каждого газогидродинамического режима на верхнем срезе трубы, поскольку именно в этой части КАМБИ моделируются процессы, происходящие в жерловой зоне базальтовых вулканов. В зависимости от количества растворенного газа в модельной жидкости любой из описанных режимов может быть выведен на поверхность. Приведем сопоставление поверхностных эффектов каждого режима с реальными динамическими параметрами базальтовых извержений.

Жидкостной режим. Газ в свободной фазе отсутствует, происходит равномерное излияние модельной жидкости на верхнем срезе трубы. В природных условиях, в кратерной зоне вулкана, жидкостной режим соответствует спокойному (без взрывов) равномерному излиянию лавы.

Пузырьковый режим обусловлен равномерным потоком пузырьков, лопающихся на поверхности жидкости. В процессе базальтовых извержений в зависимости от количества пузырьков, их размера и вязкости магмы внешние проявления этого режима могут быть весьма многообразными по своему характеру и масштабу. В жидких магмах может наблюдаться слабое «кипение» на поверхности лавового озера или слабое фонтанирование в жерле, а в более вязких – равномерная постоянная пепловая эмиссия, обусловленная разрывом перегородок между пузырьками, достигающих поверхности. Главной особенностью этого режима является равномерное поступление газовых пузырьков к поверхности в течение длительного времени.

Кластерный режим характеризуется дискретными «всплесками» модельной жидкости на выходе из канала, обусловленными появлением пузырьковых кластеров; всплески чередуются со спокойным излиянием модельной жидкости. Проявлением кластерного режима в жидких магмах в кратерной зоне вулкана является квазипериодическое образование надувающихся пузырей или кратковременных дискретных лавовых фонтанов (всплески). В более вязких расплавах происходят пепловые выбросы без бомб или с небольшим их количеством. Образование вулканических бомб обусловлено утончением и разрывом верхнего слоя магмы над кластером и разрушением крупных «перегородок» в нем, а мелкая фракция тефры (вулканический пепел) образуется при разрушении тонких стенок более мелких пузырьков, формирующих кластер. В зрелом кластерном режиме эти явления проявляются более энергично и эффектно.

Снарядный режим при выходе из канала характеризуется резкими всплесками модельной жидкости, обусловленными разрывом слоя жидкости над газовым снарядом, достигшим поверхности; всплески чередуются со спокойным излиянием или подъемом жидкости по колонне. Проявление собственно снарядного режима в процессе вулканических извержений в жидких магмах – «выскакивающие» лавовые пузыри или резкие выбросы жидкой лавы. В более вязких магматических расплавах происходит стремительный разрыв кровли снаряда на поверхности, что приводит к обособленным сильным дискретным выбросам бомб.

Возникновение кластерного и снарядного режимов приводит к существенному перераспределению потенциальной энергии по магматической колонне, причем с повышением вязкости расплава при прочих равных условиях значительно увеличивается интенсивность газового импульса, вплоть до реальных взрывов.

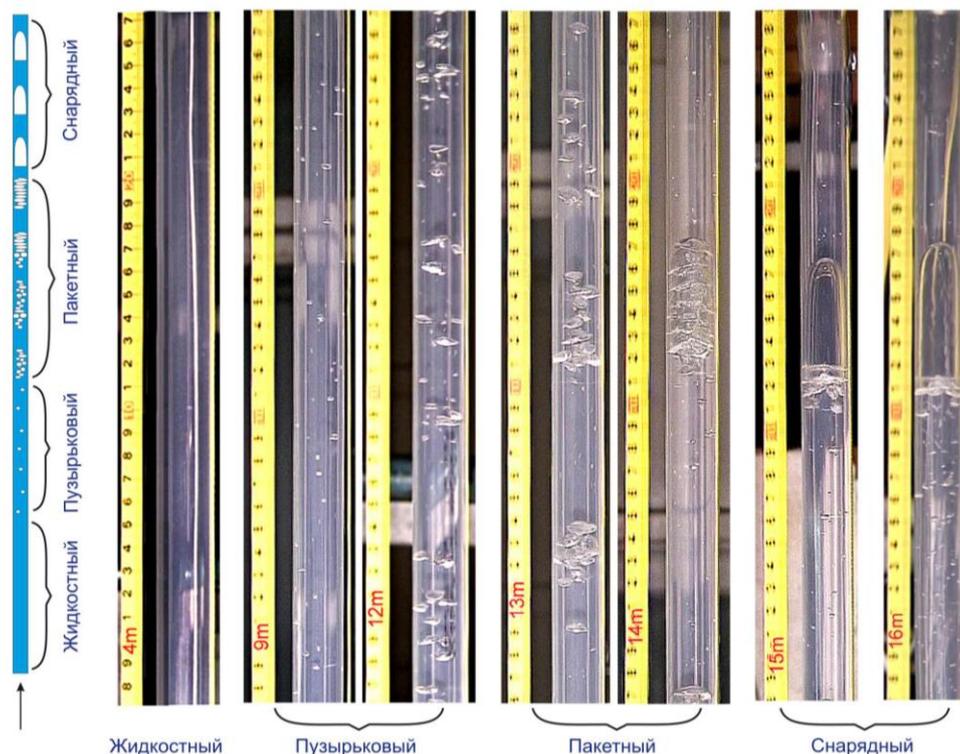


Рисунок 2 – Фрагменты газогидродинамических режимов, возникающих в процессе подъема газонасыщенной жидкости в вертикальном прозрачном шланге.

Схематическое положение газогидродинамических режимов по колонне (левый рисунок). Видеокдры режимов течения газонасыщенной модельной жидкости в вертикальном канале. Слева от шланга – мерная лента, с указанием высоты в метрах для каждого кадра (цифры показаны красным цветом).

Все кадры последовательно эволюционирующей модельной жидкости получены в ходе одного проезда видеокамеры вдоль колонны, со скоростью подъема газовой фазы

Основные выводы

1. Для исследования характера движения магматического расплава в питающей системе вулкана создан комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений (КАМБИ);

2. Анализ разнообразия режимов течения одной и той же модельной жидкости показал, что четыре режима: жидкостный, пузырьковый, кластерный и снарядный – являются продуктом закономерной эволюции газонасыщенного потока и имеют свои четкие морфологические особенности;

3. В ходе экспериментов выявлен и описан новый, ранее неизвестный режим течения двухфазных смесей в вертикальной колонне – кластерный, характеризующийся закономерным чередованием плотных скоплений газовых пузырьков (кластеров), разделенных между собой жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы. Механизм

образования кластеров обусловлен взаимодействием крупных газовых структур со стенками канала, в результате чего возникают эффекты самозапираания и торможения, и создается относительно медленно движущаяся динамическая газовая пробка – кластер;

4. Комплекс проведенных исследований позволил предложить новую модель газогидродинамического эволюционного движения магматического расплава в подводящем канале базальтового вулкана. Реализация на поверхности различных режимов течения двухфазных смесей ответственна за многообразие эксплозивных событий в кратере вулкана.

Благодарности: исследования выполнены при поддержке проекта РФФИ № 19-05-00401 А.

Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. (1984) Теплообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 302 с.
2. Лучицкий И.В. (1971) Основы палеовулканологии. Том 1. Современные вулканы. М.: Наука, 480 с.
3. Озеров А.Ю., Арискин А.А., Кайл Ф., Богоявленская Г.Е., Карпенко С.Ф. (1997) Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология. № 6. С. 614–635.
4. Сахаров В.А., Мохов М.А. (2004) Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промысловых подъемниках. М.: Издательство «Нефть и газ». 392 с.
5. Prandtl (2001) Führer durch die Strömungslehre. 718 p.
6. Rittmann A. (1960) Vulkane und ihre Tätigkeit, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. 336 p.
7. Wallis G.B. (1969) One-dimensional two-phase flow. McGraw-Hill Book Company. 408 p.

УДК 551.49+550.21

About the works of V.V. Averyev and S.A. Fedotov on the study of hydrothermal systems and magma chambers for the development of geothermal energy in Kamchatka (memory)

Victor M. Sugrobov

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Memories of the leading members of the Institute of Volcanology V.V. Averyev, S.A. Fedotov and their works on the study of hydrothermal systems and magma chambers of Kamchatka.

Keywords: hydrothermal fluids, geothermal field, steam-water well

О работах В.В. Аверьева и С.А. Федотова по изучению гидротермальных систем и магматических очагов для развития геотермальной энергетики Камчатки (воспоминание)

В.М. Сугробов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Воспоминания о ведущих сотрудниках Института Вулканологии В.В. Аверьева и С.А. Федотове и их работах по изучению гидротермальных систем и магматических очагов Камчатки.

Ключевые слова: гидротермы, геотермальное месторождение, пароводяная скважина

Валерий Викторович Аверьев

1. После окончания в 1953 г. Московского государственного университета В.В. Аверьев был оставлен аспирантом при кафедре гидрогеологии. Одновременно он работал в Институте курортологии и физиотерапии, в течение трех лет детально изучая месторождения мышьяковистых вод в Закавказье (Джультинское), на Сахалине (Синегорское) и на Камчатке (Налычевское). Результатом этих исследований явились: обобщающая работа по вопросам формирования минеральных мышьяковистых вод, ставшая основой его кандидатской диссертации, защищенной в 1961 г., и опубликованные статьи (Аверьев, 1957, Аверьев, 1960). На основе анализа обширного фактического материала и экспериментальных работ, В.В. Аверьев показал, что углекислые мышьяковистые воды, вопреки сложившимся представлениям, образуются не в результате выщелачивания мышьяк содержащих минералов, а напротив они сами привносят мышьяк в зону разгрузки и могут рассматриваться как аналоги рудообразующих растворов, принимавших участие в формировании залежей реальгара и аурипигмента.



Рисунок 1 – В.В. Аверьев

2. В 1957–1960 гг. В.В. Аверьев работает на Камчатке на Паужетской контрольно-наблюдательной станции Лаборатории вулканологии АН СССР где возглавил комплекс геолого-гидрогеологических исследований Паужетского месторождения высокотемпературных гидротерм в ходе разведочного бурения, проводимого геологоразведочной партией Камчатского геологического управления.

До бурения первой роторной скважины в 1958 г. (рис. 2) и последующих разведочных скважин В.В. Аверьевым были проведены наземные гидрогеотермические исследования.

Измерение теплосодержания пароводяной смеси естественного кипящего источника Парящего I (630 кДж/кг) позволило уже смело утверждать о существовании в недрах Паужетской термоаномалии высокотемпературных подземных вод (130-15 °С). На основе определения видимой и скрытой разгрузки термальных вод (100 л/с) оценен вынос тепла в естественных условиях (~63 МВт). Первая роторная глубокая (800 м) скважина подтвердила прогноз о нахождении здесь высокотемпературных подземных вод. На глубине уже 120-300 м уже фактически были вскрыты подземные воды с измеренной максимальной температурой 183 °С. При подъеме на поверхность высокотемпературная вода превращалась в пароводяную смесь, образующуюся за счет вскипания воды и уменьшения давления при ее восходящем движении по стволу скважины. Для определения основных гидрогеологических параметров: дебита, удельного дебита, теплосодержания, химического и газового состава воды В.В. Аверьев (Аверьев, 1960, Аверьев, 1961, Паужетские горячие...1965) разработал методику опробования пароводяных скважин (рис. 3). При этом был использован опыт зарубежных специалистов Италии, Исландии, Новой Зеландии (Grange, 1955).

Первая скважина работала в прерывистом, в гейзерном режиме, при небольшой средней производительности (6 кг/с пароводяной смеси с теплосодержанием 712 кДж/кг). В.В. Аверьев и А.С. Нехорошев причину гейзерного режима видели в опережающем движении паровой фазы в канале источника или стволе скважины, а также в несоответствии между возможностями притока нагретой воды и несоответственно большим диаметром (сечением) выводящего канала (Паужетские горячие..., 1965).



Рисунок 2 – 1958 г. В.В. Аверьев выступает на митинге в связи с началом бурения первой скважины на Паужетском месторождении (фото А.А. Гавронского)

3. На основе обследования других проявлений гидротерм вблизи месторождения, в частности вулканотектонической структуры Камбального хребта, В.В. Аверьев заключил, что Паужетское месторождение является частью этого сосредоточения разнообразной гидротермальной деятельности (позднее такие участки стали называть гидротермальными системами). Он полагал, что формирование и движение гидротерм происходит в условиях водонапорного режима, господствующего в верхней части земной коры (Аверьев, 1961).

4. В 1961 г. В.В. Аверьев успешно защищает диссертацию на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук и работает в Лаборатории вулканологии в должности ученого секретаря. После организации в 1962 г. Института вулканологии СО АН СССР в Петропавловске-Камчатском он организует и возглавляет в нем Лабораторию гидрогеологии и геотермии, в состав которой вошла Паужетская контрольно-наблюдательная станция, реорганизованная вскоре в Геотермальную экспедицию.

Основной задачей последней в 1962–1963 гг. В.В. Аверьев считал проведение опытно-эксплуатационных выпусков 10 высокопроизводительных разведочных

пароводяных скважин для оценки эксплуатационных запасов месторождения (рис. 3). Достигнутый после опытно-эксплуатационных выпусков установившийся суммарный дебит скважин 124 кг/с пароводяной смеси при давлении 0,8 атм и средней энтальпии 710 кДж/кг был утвержден в ГКЗ в качестве эксплуатационных запасов месторождения, что явилось необходимым обоснованием для официального разрешения строительства геотермальной электростанции мощностью 5 МВт (авторы отчета В.В. Аверьев, Ю.А. Краевой, В.М. Сугробов, 1963).

5. В.В. Аверьев в 1966 г. назначается заместителем директора Института вулканологии по научной работе. В докладе на втором Всесоюзном вулканологическом совещании 1964 г. и последующей статье В.В. Аверьев подчеркивает, что тепловое питание современных гидротермальных систем (мощных термоаномалий земной коры) осуществляется за счет эндогенного пара (горячего минерализованного газонасыщенного водного флюида), генерация которого является следствием самостоятельного глубинного процесса (В.В. Аверьев, 1966). Эта идея и сегодня, так или иначе обсуждается специалистами.

6. В 1966 г. В.В. Аверьев в специальной записке «Соображения о создании геотермальной энергобазы на Камчатке», переданной руководству области и в различные ведомства, рекомендует использовать геотермальные ресурсы в качестве основного источника энергоснабжения Камчатки. По прогнозной оценке геотермальные ресурсы выделенных им трех геотермальных районов в восточной вулканической зоне Камчатки (Паужетском, Мутновском, Семячикском) могут послужить базой для строительства крупных геотермальных электростанций суммарной мощностью свыше 300 МВт. В основу оценки ресурсов взяты данные о выносе тепла на термальных полях и гидротермальных системах, полученные под руководством и личном участии В.В. Аверьева. В частности, подчеркнута большая величина выноса тепла (порядка 300 МВт) в Долине гейзеров (Кононов, 1965).



Рисунок 3 – Паужесткое месторождение. Опытно-эксплуатационные выпуски (фото В. Сугробва, 1963 г.)

7. В.В. Аверьев обратил внимание на возможность использования тепловых ресурсов магматических масс в геотермальной энергетике после обнаружения под Авачинским вулканом геофизической аномалии, интерпретируемой в качестве неглубокозалегающего промежуточного магматического очага (В.В. Аверьев и др. 1966). Предварительная оценка запасов тепла очага сопоставимо с получением 1000 МВт электрической мощности.

8. В 1966–1968 гг. В.В. Аверьев разрабатывает план глубокого бурения на гидротермальных системах и в зоне влияния магматических тел для изучения и углубления знаний о гидротермальном процессе и перспективах выявления и освоения ресурсов глубинных термоаномалий. По комплексу данных (пригодность объекта, состояние изученности, условия организации работ) предложены для бурения скважин глубиной 5 км следующие объекты: Паратунская низкотемпературная гидротермальная система, Паужетская высокотемпературная гидротермальная система, зона влияния промежуточного магматического очага Авачинского вулкана (оценка возможного использования ресурсов тепла в энергетических целях). Предложение «О глубоком бурении на современных гидротермальных системах и в зоне влияния магматических тел» В.В. Аверьев обсуждал в Москве в организациях Академии наук и Министерства геологии.

Возвращаясь из командировки, Валерий Викторович Аверьев трагически погиб в авиационной катастрофе 29 февраля 1968 г.

2. Сергей Александрович Федотов

1. После окончания в 1953 г. геологического факультета Московского Государственного университета им. М.В. Ломоносова, по специальности геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых С.А. Федотов поступил и закончил в 1956 г. аспирантуру МГУ. С 1957 г. работает в Института Физики Земли АН СССР зав. лабораторией сейсмичности тихоокеанского пояса, возглавляя в 1957–1970 годы Тихоокеанскую сейсмологическую экспедиции (ТСЭ). Уже в 1958 г. С.А. Федотов защитил кандидатскую диссертацию.

2. В 1960 г. Сергей Александрович посетил Паужетку для осмотра местной сейсмостанции в связи с включением ее в единую сеть сейсмостанций Курильских островов и Камчатки с целью проведения детальных сейсмологических исследований. Он проявил интерес к работам по разведке месторождения парогидротерм и извлечения скважинами теплоносителя для будущей геотермальной электростанции. В 1969 г. С.А. Федотов был на

Паужетке во время приезда руководителя ДВНЦ чл.-корр. АН СССР А.П. Капицы вместе осмотревших работу Паужетской ГеоЭС, эксплуатация которой началась в 1967 г.

3. С 1971 до 2004 г. с небольшим перерывом С.А. Федотов руководил Институтом вулканологии и Институтом вулканологии и сейсмологии РАН, в стенах которого при постоянной поддержке и внимания директора проводились исследования по изучению всех аспектов современного гидротермального процесса. Так, несмотря на занятость административными делами и своей личной важной научной работой, С.А. Федотов возглавил оргкомитет симпозиума «Изучение и использование глубинного тепла Земли в вулканических областях», проходившего в 1976 г. в Петропавловске-Камчатском.

Тем самым он подчеркнул заинтересованность Института в исследованиях по геотермальной проблематике, особенно касающихся извлечению тепла нагретых сухих горных пород (доклады проф. Ю.Д. Дядькина, Ленинградский горный институт и доклады О.А. Кремнева, А.В. Шурчкова и др. из Института технической теплофизики АН УССР). С.А. Федотов стал активным участником развития предложения В.В. Аверьева, Б.Г. Поляка об использовании тепла промежуточного очага Авачинского вулкана (С.А. Федотов и др., 1977).

4. С.А.Федотов способствовал организации зарубежных командировок сотрудников Института для ознакомления с работами по изучению вулканов и связи вулканизма с сейсмичностью. В группу вулканологов в некоторых поездках попал и геотермик. В 1973 г. появилась возможность кратко ознакомиться с геотермальными месторождениями Италии – Лардерелло и Травале. В 1986 г. В командировке в Республику Филиппины (Федотов и др. 1987) удалось посетить и месторождения и ГеоЭС (рис. 4,5). К тому времени в стране было разведано 30 геотермальных месторождений, обеспечивающих работу геотермальных станций общей мощностью 894 МВт. Наиболее мощные станции Макбан (390 МВт) и Тонгонан (112 МВт).

5. Последующие разработки проблемы возможного использования тепла магматических очагов опираются на фундаментальные исследования С.А. Федотова о магматических питающих системах и механизме извержений вулканов (Федотов, 2006). Новая оценка под руководством С.А. Федотова (Федотов и др., 2007) возможности использования ресурсов тепла магматического очага Авачинского вулкана (рис. 6).



Рисунок 5 – С.А. Федотов на участке эксплуатационных скважин месторождения Макбан (фото В. Сугрובה)

6. В последние годы жизни С.А. Федотов высказывался за увеличение ресурсов Мутновского геотермального месторождения (рис. 7) при возможном воздействии системы магматических очагов на гидротермальную систему. С.А. Федотов также в качестве основного исследователя участвовал в проекте РНФ 16-17-10008 «Геофлюидодинамика активных вулканов и прилегающих гидротермальных систем» [13].

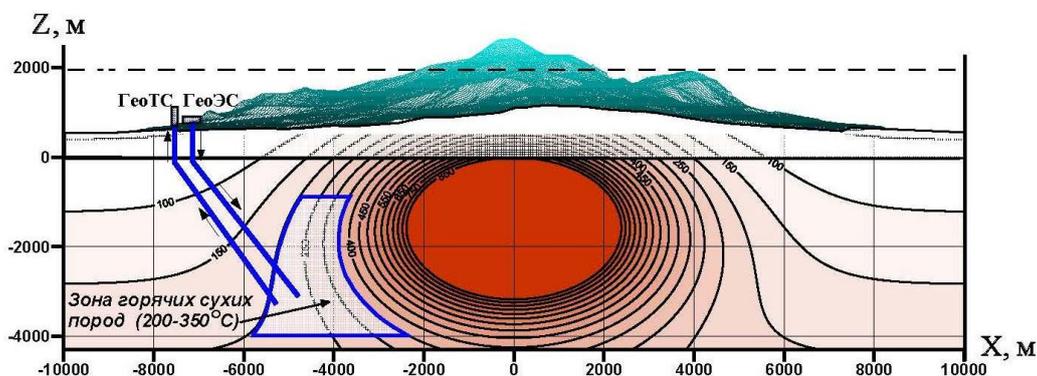


Рисунок 6 – Расчетное распределение температур вокруг магматического очага вулкана Авачинский в разрезе и положение скважин возможной геотермальной циркуляционной системы (Федотов и др., 2007)

7. С 1979 г. С.А. Федотов был главным редактором созданного им академического журнала «Вулканология и сейсмология», которым руководил до последних дней жизни. В журнале всегда находилось место для авторов статей посвященных результатам исследований по проблемам современного гидротермального процесса, изучения и практического использования геотермальных ресурсов.



Рисунок 7 – Посещение группой сотрудников Института вулканологии ДВО РАН во главе с С.А. Федотовым Мутновской ГеоЭС, 2002 г. Слева направо: ст.н.с. А.Ю. Поляков; зам. директора по общим вопросам В.А. Казанцев; водитель Н.В. Кочетков; директор, академик РАН С.А. Федотов; ст. инженер М.Д. Лесных; вед. гидрогеолог АО Геотерм Л.К. Москалев; зам. директора по науке, д.г.-м.н. А.В. Кирюхин; зам. директора по науке, д.г.-м.н. Г.А. Карпов; бывший зам. директора по общим вопросам В.М. Дудченко; лауреат Гос. премии РФ, к.г.-м.н. В.М. Сугробов

Список литературы

1. *Аверьев В.В.* 1957. Углекислые мышьяковистые Синегорские воды на Южном Сахалине. Бюл. МОИП, отд. геолог. т. XXXII (3). С. 143–149
2. *Аверьев В.В.* 1960. О природе углекислых мышьяковистых вод и их рудообразующей деятельности / В кн.: Вопросы формирования и распространения минеральных вод СССР.
3. *Аверьев В.В.* 1960. Особенности динамики пароводяных скважин. Труды Лаборатории вулканологии. в. 18. С. 113-122.
4. *Аверьев В.В.* 1961. К вопросу о методике опробования пароводяных скважин (русс., англ.) / UN conference on new sources of energy.
5. *Аверьев В.В., Вакин Е.А., Поляк Б.Г.* 1966. Перспективы использования подземного тепла вулканических областей. В кн.: Геотермические исследования и использование тепла Земли. Труды второго совещания по геотермическим исследованиям в СССР. М.: Наука, С. 273-278.
6. *Кононов В.И.* 1965. Влияние естественных и искусственных очагов тепла на формирование химического состава подземных вод. М.: Наука.
7. *Паужетские горячие воды на Камчатке.* М.: Наука, 1965. 208 с.
8. *Федотов С.А., Балеста С.Т., Дроздин В.А. и др.* 1977. О возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана. Бюлл. вулк. станций. № 53. С. 27–34.
9. *Федотов С.А., Сугробов В.М.* 1987. Отчет о командировке в республику Филиппины. рукопись, Фонды Института вулканологии. 48 с.
10. *Федотов С.А.* 2006. Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 456 с.
11. *Федотов С.А., Сугробов В.М., Уткин И.С. и др.* 2007. Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения. «Вулканология и сейсмология». № 1).
12. *Grange L.J.* 1955. Geothermal steam for Power in New Zealand. Wellington.
13. *Кирюхин А. В., Федотов С. А., Кирюхин П. А., Черных Е. В.* Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3–17.
14. *Кирюхин А. В., Сугробов В. М.* Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019650-65>.

Magma fracking and hydrothermal systems beneath active volcanoes

Alexey Kiryukhin

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
AVKiryukhin2@mail.ru*

Active volcanoes are associated with microearthquake (MEQ) hypocenters that form plane-oriented cluster distributions. These are faults delineating a magma injection system of dykes and sills. The Frac-Digger program was used to track fracking faults in the Kamchatka active volcanic belt and fore-arc region of Russia. In the case of magma laterally injected from volcanoes into adjacent structures, high-temperature hydrothermal systems arise, for example at Mutnovsky and Koryaksky volcanoes. Thermal features adjacent to these active volcanoes respond to magma injection events by degassing CO₂ and by transient temperature changes. Geysers created by CO₂-gaslift activity in silicic volcanism areas also flag magma and CO₂ recharge and redistributions, for example at the Uzon-Geyserny, Kamchatka, Russia and Yellowstone, USA magma hydrothermal systems. Seismogenic faults in the Kamchatka fore-arc region are indicators of geofluid fracking; those faults can be traced down to 250 km depth, which is within the subduction slab below primary magma sources.

Keywords: magma, hydrothermal, fracking, volcanoes

Магматический фрекинг и гидротермальные системы под активными вулканами

А.В. Кирюхин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Активные вулканы ассоциируются с микросейсмичностью (МЕQ) с плоско-ориентированными гипоцентрами землетрясений. Эти плоскости трассируют систему магматического фрекинга в форме даек и силлов. Для картирования магматической активности вулканов и активных разломов в активном вулканическом поясе и преддуговой зоне Камчатки используется программа Frac-Digger. В случае, если инъекции магмы из вулканических аппаратов происходят латерально в прилегающие структуры, формируются высокотемпературные гидротермальные системы (как на Мутновском и Корякском вулканах). Термопроявления, прилегающие к активным вулканам реагируют на эпизоды инъекции магмы дегазацией CO₂ и изменениями температуры. Гейзеры, являющиеся результатом CO₂-газлифта в районах кислого вулканизма, также являются индикаторами перераспределения разгрузки магмы и CO₂. Примерами являются Узон-Гейзерная (Камчатка, Россия) и Йеллоустонская (США) магмо-гидротермальные системы. Сейсмогенные разломы в пред-дуговой зоне на шельфе Камчатки являются индикаторами геофлюидного гидроразрыва до глубины 250 км, происходящего внутри субдукционной плиты до уровня генерации первичных магматических очагов.

Ключевые слова: магма, гидротермальный, фрекинг, вулканы

1. Введение

Развитие общих теоретических основ и использование эффективных вычислительных инструментов геотермофлюидомеханики для описания природных и технологических процессов тепломассопереноса геофлюидов (в жидкой, газовой, нефтяной и магматической фазе) необходимо в связи с решением фундаментальных проблем наук о Земле. Отметим среди этих проблем следующие: 1) описание и прогноз функционирования вулканов и прилегающих к ним гидротермальных систем (в естественных и нарушенных эксплуатацией условиях); 2) создание естественных и искусственных циркуляционных систем в виде продуктивных гидротермальных, нефтяных и газовых резервуаров с использованием

термолифта, гидроразрыва и химического преобразования вмещающих горных пород; 3) выяснение геофлюидомеханических условий генерации сильных землетрясений и возможности их прогнозирования.

В данной статье кратко изложены результаты приложений геотермофлюидомеханических моделей для анализа условий функционирования, формирования и прогноза эксплуатации гидротермальных и вулканических систем, а также с геофлюидомеханических позиций рассматриваются региональные сейсмогенные разломы Камчатки (Кирюхин, 2020) (рис. 1).

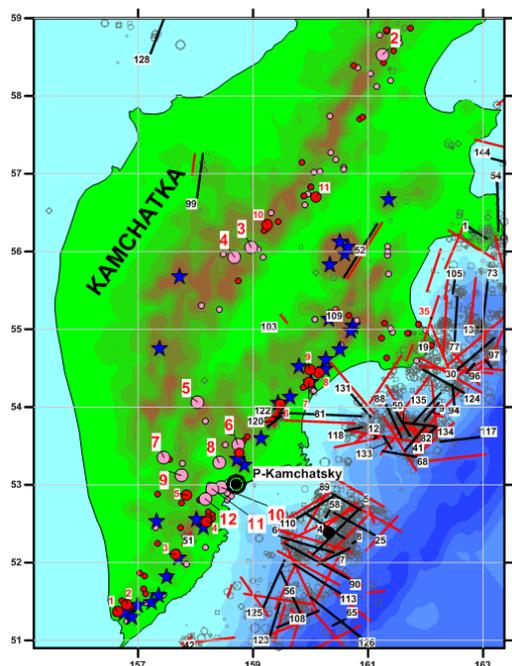


Рисунок 1 – Схема расположения активных вулканов, гидротермальных систем и сейсмогенных разломов Камчатке. Легенда: 1 – Активные вулканы (1, Камбальский; 2, Кошелевский; 3, Дикий Гребень; 4, Ильинский; 5, Желтовский; 6, Ксудач; 7, Асачинский; 8, Мутновский; 9, Опала; 10, Горельий; 11, Авачинский; 12, Корякский; 13, Жупановский; 14, Карымский; 15, Малый Семячик; 16, Большой Семячик; 17, Кихпиньич; 18, Тауниши; 19, Крашенинникова; 20, Кроноцкий; 21, Комарова; 22, Гамчен; 23, Кизимен; 24, Пл. Толбачик; 25, Безьямный; 26, Ключевской; 27, Ушковский; 28, Шивелуч; 29, Хангар; 30, Ичинский); 2 – Высокотемпературные гидротермальные системы (1, Кошелевская; 2, Паужетская; 3, Ходуткинская; 4, Мутновская; 5, Б-Банная; 6, Карымская; 7, Семячикская; 8, Гейзерная; 9, Узонская; 10, Апапельская; 11, Киреунская; 12, С-Корякская); 3 – Гидротермальные системы с температурой ниже 150 °С; 4 – Группы термальных источников: (а) температура от 50 до 100 °С, (б) температура от 20 до 50°С. Примечание: Нумерация сейсмогенных разломов и их описание в см. в статье (Kiryukhin et al., 2020)

2. Мутновский геотермальный район

Показано, что вулкан Мутновский действует как инжектор магмы и воды в Северо-Мутновскую зону протяженностью 25 км. Инъекции магмы в виде даек фиксируются на глубине от –4 до –2 км абс. Водное питание продуктивных резервуаров происходит при таянии ледника Мутновского, что подтверждается данными изотопного состава теплоносителя эксплуатационных скважин и термальных разгрузок. По результатам TOUGH2-моделирования эксплуатирующийся резервуар способен обеспечить устойчивую продукцию 65–83 МВт эл., до 105 МВт эл. при использовании бинарных ГеоЭС. Концептуальное iTOUGH2-EOS1sc-моделирование гидротермальной системы в целом объясняет ее формирование за счет теплового питания при инъекции даек вулкана Мутновский-4 и водного питания за счет инфильтрации воды через жерла вулканов Мутновский-2 и -3.

3. Гидротермальные системы Узон-Гейзерной кальдеры

Показано, что за период с 1941 по 2019 гг. в Долине гейзеров происходят значительные изменения интервала между извержениями (ИВЕ) и характеристик извержений гейзеров, изменения химического и газового состава термальных разгрузок. Тем не менее общая глубинная разгрузка (оцениваемая по Cl^- -иону) остается относительно стабильной, и поэтому изменения объясняются перераспределением тепломассопотока в результате катастрофического обвала 03.06.2007 и селя 03.01.2014. Результаты моделирования и прямые измерения температуры в каналах гейзеров Великан (1994, 2007, 2015–2017) и Большой (2015–2017) показывают, что извержения гейзеров происходят в режиме газлифта. Изменения режима гейзера Великан связываются с повреждением и частичным заполнением его канала обломочным материалом, снижением поступления CO_2 после селя 03.01.2014.

В работе (Kiryukhin, Каров, 2020) изложена информация о новом гейзере в кальдере Узон.

4. Корякско-Авачинская группа вулканов

Анализ локальной сейсмичности в пределах Авачинско-Корякской группы вулканов в период 2000–2016 г. позволяет выявить последовательность магматического фразинга в

следующих зонах: 1 – неглубокозалегающий коровый магматический очаг в юго-западной части Корякского вулкана, состоящий из комбинации даек и силлов в диапазоне глубин от –2 до –5 км абс.; 2 – зона аккумуляции даек в субмеридиональной зоне (7,5 × 2,5 км) в диапазоне глубин от –2 до –5 км абс.; 3 – комплекс даек и силлов в конусе Авачинского вулкана в диапазоне отметок от 1 до 2 км абс.

Концептуальное TOUGH2-моделирование показало наличие высокотемпературной гидротермальной системы в северном секторе Корякского вулкана (Северо-Корякская высокотемпературная гидротермальная система) и скрытого геотермального резервуара под южным склоном Корякского вулкана (кровля на отметке –1 км абс.), который может являться целью последующего эксплуатационно-разведочного бурения.

Областью водного питания Северо-Корякской гидротермальной системы (по изотопному составу воды) является постройка Корякского вулкана, ее температура по данным геотермометров оценивается до 300 °С, тепловое питание осуществляется за счет инъекций магмы, что подтверждается изотопными магматогенными характеристиками CO₂ в термоминеральных источниках на северном склоне Корякского вулкана и термочувствительностью разгрузок на эпизоды инъекций даек.

5. Паратунские гидротермальные системы

Данные по изотопному составу воды показывают, что основная область водного питания Паратунского геотермального резервуара – Вилючинский вулкан и приподнятые структуры кальдеры Леонова (верховья р. Карымшина), удаленные от месторождения на 25 км к югу. Термогидродинамическое TOUGH2-моделирование естественного состояния и истории эксплуатации 1965–2019 гг. позволяют оценить суммарный приток глубинного теплоносителя (190 кг/с) и фильтрационно-емкостные параметры резервуара. Моделирование подтвердило площадную разгрузку термальных вод из продуктивного резервуара в вышележащий горизонт грунтовых вод и объясняет постепенное увеличение хлор-иона притоком хлоридных вод через восточную границу геотермального резервуара (где возможно существование еще одного продуктивного участка месторождения).

Анализ экономической эффективности проекта эксплуатации Паратунского геотермального месторождения с погружными насосами обеспечивающими добычу 1150 кг/с теплоносителя с начальной температурой 80 °С и конечной температурой после использования 30 °С показывает, что добыча тепловой энергии для удаленных потребителей (г. Петропавловск-Камчатский, г. Елизово и г. Вилючинск) составит 1630 тыс. Гкал в год (216 МВт тепл.), что обеспечивает теплотребление в системах централизованного теплоснабжения Петропавловска-Камчатского. Подключение к эксплуатации Верхне-Паратунского геотермального месторождения, являющегося аналогом Паратунского и обладающего сопоставимыми запасами геотермальной энергии – полностью решает проблему теплообеспечения основных потребителей Камчатки за счет геотермальных источников энергии.

6. Северная группа вулканов

На примере трещинного базальтового извержения Толбачинского вулкана 2012–2013 гг. показано, что каталоги локальных землетрясений, связанных с извержениями вулканов, содержат плоско-ориентированные кластеры гипоцентров. Их можно интерпретировать как эпизоды внедрения силлов и даек при инъекции магмы под вулканами во время подготовки и при развитии извержений. Таким образом, используя данные по ориентации и размерам сейсмогенных площадок, можно определить характеристики процессов магматического фракинга (магмо-гидроразрыва) под активными вулканами.

Анализ распределения плоско-ориентированных кластеров землетрясений под Ключевской группой вулканов и влк. Шивелуч показывает следующее: (1) Первичный магматический очаг, питающий группу вулканов находится, вероятно, на глубине –165...–205 км под Ключевским вулканом, выше – зоны инъекции магмы в виде даек и силлов, интерпретируемые как коровый К2 (от –31 до –28 км) и периферический К1 (от –1 до +2 км абс.) магматические очаги; (2) Влк. Толбачик характеризуется инъекциями

даек в интервале глубин от -8 до -1 км; (3) Под влк. Безымянный инъекции магмы происходят в виде силлов в диапазоне глубин от -2 до $+2$ км. Его питание осуществляется по дайкам из корового магматического очага влк. Ключевской К2; (4) Инъекции магмы в виде силлов в диапазоне глубин от -4 до -2 км абс. и от 0 до $+2$ км преобладают под влк. Шивелуч, где можно предполагать наличие двух периферических магматических очагов.

Вулканы Ключевской группы являются индикаторами геомеханического состояния под ними: под влк. Ключевской преобладают в целом условия горизонтального радиального растяжения (NF), в зонах корового К2 и периферического очага К1 фиксируются условия радиального сжатия; под влк. Толбачик преобладают условия горизонтального растяжения с ориентацией максимального горизонтального напряжения в запад-север-западном направлении; под влк. Шивелуч и Безымянный фиксируются условия горизонтального сжатия (RF).

Зоны магматического фракинга в пределах активных вулканических аппаратов приводят к формированию проницаемых резервуаров с вертикальной протяженностью до 35 км (Ключевской) и поперечником до 15 км (Шивелуч) в зависимости от геомеханического состояния вмещающих массивов горных пород. iTOUGH2-EOS1sc-моделирование на примере Ключевского вулкана показывает, что в этих резервуарах происходит гидротермальная циркуляция.

7. Паужетская гидротермальная система

Гидротермальный резервуар Паужетского геотермального месторождения приурочен к водоносному термовмещающему комплексу верхнемиоцен-плейстоценовых вулканогенных отложений, развитому в чехле артезианско-вулканогенного бассейна (ВАБ), имеет длину не менее 2 км в широтном направлении и не менее 2,5 км в меридиональном направлении. Его средняя вскрытая мощность не менее 481 м. В центральной части месторождения гидротермальный резервуар сообщается с наиболее продуктивным разломом, линия его простирается с азимутом 336° трассируется на массивы дацитовых экструзий $\zeta_{Q_{2-3}}$ на западном склоне Камбального хребта и далее на Южно-Камбальные паровые струи (1 гр.), что указывает на его термо-магмо-подводящий характер. Совместный анализ теплового и химического режима эксплуатации (1966–2019) показывает проникновение в эксплуатирующийся гидротермальный резервуар холодных метеорных вод (по изменению концентрации хлор-иона разбавление исходного теплоносителя по индивидуальным добычным скважинам от 30 до 62 %). Значительная доля метеорных вод подтверждается данными по изотопному составу воды 2005–2006 и 2018 гг. Прогнозное численное моделирование до 2032 г. при начальных параметрах добычных скважин на октябрь 2006 г. показывало возможность стабильного получения пара при условии последовательного бурения и ввода в эксплуатацию пяти дополнительных скважин 6,3 МВт. При применении бинарной технологии на Паужетском месторождении из действующих добычных скважин можно получить 11,2 МВт. Разбуривание нижних этажей продуктивного геотермального резервуара до глубин 1,5–2,0 км позволит достичь температур выше 250°C и существенно увеличить паропроизводительность Паужетского геотермального месторождения.

8. Региональные сейсмогенные разломы Камчатки

Выявленные по данным региональной сейсмичности Камчатки плоско-ориентированные кластеры гипоцентров землетрясений интерпретируются в качестве сейсмоактивных разломов. Среди них выделены 18, характеризующиеся наиболее высокой сейсмической активностью. В целом преобладают сейсмогенные разломы с углами падения 50 – 70° на ЗСЗ (азимут падения 300 – 310°), параллельные линии глубоководного желоба, при этом выделяются также разломы иной ориентации. Окончание ближайшего к г. Петропавловск-Камчатский сейсмоактивного разлома этого класса находится на расстоянии около 90 км от города на глубине -5 км абс., разлом направлен в сторону г. Петропавловска-Камчатского.

На примере Кроноцкого землетрясения (05.12.1997) показано, что в очагах сильных землетрясений в очень кратком интервале времени последних форшоков и первых афтершоков существует кластеризация с изменением геомеханического состояния от условий растяжения NF до условий сжатия RF.

Кластеры 102 из 200 наиболее сильных землетрясений Камчатки формируют 11 плоско-ориентированных площадок (от 1600 до 5400 км²) на восточном шельфе вдоль побережья Камчатки на глубинах до –40 км абс. Указанные площадки интерпретируются как результат гидроразрыва (вода, нефть, газ) с генерацией сильных землетрясений по сдвиговому опережающим (30°) разломам. Зафиксированные на восточном шельфе Камчатки разгрузки метана и отложения газогидратов (Селиверстов, 2009) также указывают на это. Циклически возрастающие поровые давления в указанных выше резервуарах могут служить триггерами повторяющихся катастрофических землетрясений.

9. Гидромеханическое моделирование магматического фракинга под вулканами

CFRAC-моделирование инъекции магмы в трещину-разлом при геомеханических условиях фундамента Мутновского вулкана (горизонтальное сжатие RF, угол падения 30°, размеры от 2 × 2 км² до 4 × 4 км², глубина – 3 км абс.) показывает, что при инъекции магмы с расходом 2000 кг/с в течение 1 сут. раскрытие трещины увеличится до 0,05 м, сдвиговые деформации приводят к генерации нескольких сотен микроземлетрясений с магнитудой до 6.

CFRAC-моделирование инъекции магмы в трещину в условиях, характерных для фундамента Корякского вулкана (режим нормальных разломов, угол падения 60°, размеры 2 × 2 км², глубина – 4 км ниже уровня моря) показывает, что при расходе магмы 2000 кг/с в течение 1 сут. раскрытие трещины составит до 0,06 м, сдвиговые деформации с генерацией от десятков до первых сотен землетрясений с магнитудой до 4,8. Таким образом, на основе гидромеханического моделирования показано, что плоско-ориентированные кластеры землетрясений под активными вулканами синхронизированы с процессами магматического фракинга или инъекции даек.

10. Выводы

Полученные выше частные закономерности можно сформулировать в более общем виде следующим образом:

- 1) активные вулканы могут работать в качестве инжекторов магмы, CO₂ и воды в прилегающие структуры, при этом формируются высокотемпературные продуктивные резервуары;
- 2) сейсмические данные отражают характеристики магматического фракинга и геомеханического состояния под активными вулканами;
- 3) резервуары магматического фракинга могут вмещать продуктивные геотермальные резервуары;
- 4) сейсмогенные разломы на шельфе Камчатки являются индикаторами генерации флюидов и распространения воды до глубин 150 км;
- 5) гейзеры являются результатом CO₂-газлифта в активных областях кислого вулканизма. Непрерывный мониторинг концентрации магматогенного CO₂ в гидротермальных системах – ключ для понимания взаимосвязи вулканической и гидротермальной активности, прогноза сильных землетрясений.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту # 18-05-00052-20.

Список литературы

1. *Кiryukhin A.V.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем СПб.: Эко-Вектор. 2020. 431 с. ISBN 978-5-907219-02-1.
2. *Селиверстов Н.И.* Геодинамика сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга. 2009. 191 с.
3. *Kiryukhin A.* Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations / A. Kiryukhin, E. Chernykh, A. Polyakov, A. Solomatin // Geosciences. 2020. Vol. 10. P. 52, DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10020052>.
4. *Kiryukhin A.V., G. Karpov G.* CO₂-Driven Gas Lift Mechanism in Geyser Cycling (Uzon Caldera, Kamchatka) / A. Kiryukhin, G. Karpov // Geosciences. 2020. Vol.10, No.5. P.180, DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10050180>.

CHAPTER II. HYDROTHERMAL SYSTEMS IN VOLCANIC AREAS

РАЗДЕЛ II. ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ОБЛАСТЕЙ

УДК 550.42

Geothermal and geochemical features of mineral waters of the Elbrus and Kazbek volcanic regions of the Greater Caucasus

Vassily Yu. Lavrushin, Altyn Aydarkozhina, Olga Ye. Kikvadze

*Geological Institute RAS, Moscow, Russia
v_lavrushin@ginras.ru*

The data about 170 high pCO₂ mineral springs of the Greater Caucasus associated with the Pliocene and Quaternary volcanic centers are summarized. It has been shown that the chemical characteristics of the water and gas phases of the waters of the Elbrus and Kazbek oblasts practically do not differ. It was concluded, that young volcanic activity is not impact on water temperatures. However, small differences of their gases at the level of mean values $\delta^{13}\text{C}$ in CO₂ are noticeable (–8,3 and –7,3 ‰, respectively). It was also found that gases often contain a significant admixture of nitrogen and methane. The $\delta^{15}\text{N}$ determinations show that gases often contain non-atmospheric nitrogen, which is mainly of crustal origin. Methane with abnormally high $\delta^{13}\text{C}$ values (up to –17,2 ‰) was found in the gases of the Elbrus region. It was shown that it most likely has a crustal genesis, and high $\delta^{13}\text{C}$ values are a consequence of the formation of gases in the area affected by the volcanogenic thermal anomaly.

Keywords: Greater Caucasus, Elbrus and Kazbek volcanic regions, carbonic waters

Геотермические и геохимические особенности минеральных вод Эльбрусской и Казбекской вулканических областей Большого Кавказа

В.Ю. Лаврушин, А. Айдаркожина, О.Е. Киквадзе

Геологический институт РАН, Москва, Россия

Обобщены данные о ~170 углекислых источниках Большого Кавказа, ассоциирующихся с вулканическими центрами плиоцен-четвертичного возраста. Однако молодая вулканическая активность почти не проявляется в измеренных температурах воды. Показано, что по химическим характеристикам водной и газовой фазы воды Эльбрусской и Казбекской областей практически не различаются. Однако заметны небольшие различия их газов на уровне средних значений $\delta^{13}\text{C}$ в CO₂ (–8,3 и –7,3 ‰, соответственно). Также установлено, что в газах часто присутствует значительная примесь азота и метана. Определениями $\delta^{15}\text{N}$ показано, что в газах часто присутствует неатмосферный азот, который в основном имеет коровый генезис. В газах Приэльбрусья обнаружен метан с аномально высокими значениями $\delta^{13}\text{C}$ (до –17,2 ‰). Показано, что он, вероятнее всего, имеет коровый генезис, а высокие значения $\delta^{13}\text{C}$ являются следствием формирования газов в области влияния вулканогенной термической аномалии.

Ключевые слова: Большой Кавказ, Эльбрусская и Казбекская вулканические области, углекислые воды

Введение

Известно, что газовый режим подземных вод чутко реагирует на проявления тектоно-магматической активности, эволюционируя от газов азотного и метанового состава платформенных областей к углекислым газам вулканически-активных районов (Дислер, 1971). Горное сооружение Большого Кавказа не является исключением из этого правила. Здесь выделяется две крупные вулканические области – Эльбрусская и Казбекская, возраст

вулканических центров которых относится к плиоцен-четвертичной фазе (Милановский, Короновский, 1973). Максимальная активность большинства центров наблюдалась в плейстоцене и раннем голоцене. В позднем голоцене она постепенно снижалась. Последнее извержение Эльбруса датируется началом нашей эры (I–II вв.), а Казбека – VIII в. до н.э. (Богатилов и др., 2001; 2002). Ранее было показано (Polyak et. al, 2000; Лаврушин, 2012), что область развития вулканических плиоцен-четвертичного возраста маркируют углекислые газы, в которых повсеместно присутствует мантийный гелий ($^3\text{He}/^4\text{He} = 50\dots 650 (\times 10^{-8})$). В этих же работах было показано, что в газах углекислых вод присутствует мантийная CO_2 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} = -8\dots -3 \text{ ‰}$). Вместе с тем, изотопные характеристики других компонентов газового состава вод (N_2 и CH_4) до сих пор практически не были изучены.

Целью данной работы было систематизация массива геотермических и газогеохимических данных, характеризующих газы минеральных вод Эльбрусской и Казбекской вулканической областей.

Материалы и методы исследования

В 2016, 2017 и 2018 гг. было проведено опробование углекислых источников Эльбрусской и Казбекской вулканических областей, располагающихся как на северном, так и на южном склонах Большого Кавказа. Всего было опробовано более 170 углекислых водопроявлений. Из них отбирались пробы свободно выделяющихся газов и пробы воды, в которых помимо химического состава определялся комплекс изотопных характеристик – $\delta^{13}\text{C}$ в CO_2 и CH_4 , $\delta^{15}\text{N}$ в N_2 , $\delta^2\text{H}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в H_2O .

Геотермические особенности углекислых вод

Несмотря на генетическую связь углекислых вод с проявлениями молодого вулканизма, *измеренные температуры* большинства естественных углекислых источников меняются в диапазоне от 3-5 до 10-15 °С и снижаются с увеличением абсолютных отметок выходов вод. Это указывает на отсутствие влияния вулканогенных термоаномалий на температурный режим источников.

Оценки температур формирования солевого состава вод по различным геотермометрам (Mg-Li, Na-K, Na-Li, Si, Mg-K, B) дают противоречивые результаты – различия часто достигают 100-150 °С. Это обусловлено недосыщением большинства вод относительно основных породообразующих минералов. Однако источники, ближайшие к вулканическим центрам все же систематически показывают более высокие (на 30-70 °С) Mg-Li и Si-температуры. Поэтому можно считать, что вулканическая активность накладывает определенный отпечаток на формирование солевого состава вод.

Геохимические особенности флюидных систем Казбекской и Эльбрусской областей

Исследование *солевого состава вод* показало, что воды Эльбрусской и Казбекской областей принципиально не различаются по величине pH, минерализации (1-3 г/л) и композиции макрокомпонентов. Для этих минеральных вод характерны повышенные содержания многих микрокомпонентов (B, Li, Rb, Sr, Ba, Cs и т.д.), из бальнеологически значимых в воде часто присутствуют: кремний до 220 мг/л (H_4SiO_4); бор до 145 мг/л (B); железо до 63 мг/л. При этом сильнее всего обогащены микрокомпонентами воды источников, располагающиеся ближе всего к молодым вулканическим центрам.

В *химическом составе газов* доминирует CO_2 . Остальные компоненты газовой фазы (N_2 , CH_4 , He, Ar) занимают подчиненное положение. Особенностью газов Большого Кавказа является часто наблюдаемая примесь метана, концентрация которого может иногда достигать 0,5-15 %. Если для источников Казбекской области такие концентрации CH_4 вполне объяснимы (они выходят в поле развития сланцевых толщ J_{1-2}), то природа высоких концентраций CH_4 , отмечаемых в некоторых источниках Приэльбрусья, дискуссионна. Последние выходят в поле развития гранито-гнейсов и метаосадочных пород палеозойского возраста. Поэтому здесь отсутствует видимая связь вод с осадочными породами, богатыми органическими остатками. Можно предполагать генетическую связь метана с проявлениями вулканической активности. Однако концентрации CH_4 , N_2 и He связывают корреляционные

зависимости прямого характера, что на первый взгляд можно трактовать как разбавление «реликтовых» (первичных) газов подземных вод вулканогенной CO_2 .

Исследование *изотопных характеристик углерода в CO_2* показало, что газы Эльбрусской и Казбекской областей по этому показателю немного различаются. Значения $\delta^{13}C$ в них меняются от $-13,6$ до $-2,6$ ‰ ($\delta^{13}C_{cp} = -8,3$ ‰) и от $-12,5$ до $-2,6$ ‰ ($\delta^{13}C_{cp} = -7,3$ ‰) (соответственно).

В углекислых газах Большого Кавказа впервые был исследован *изотопный состав азота ($\delta^{15}N$)*. Значения $\delta^{15}N$ варьируют от $-4,0$ до $+5,6$ ‰. Положительные значения $\delta^{15}N$ более характерны для пластовых углекислых вод Северного Предкавказья (район КМВ), но так же встречаются в некоторых источниках Главного Хребта, в газах которых отмечено присутствие повышенных концентраций метана (таб. 1).

Корреляции значений $\delta^{15}N$ с концентрациями N_2 и CH_4 подчеркивают присутствие в газах больших количеств неатмосферного азота (рис. 1а) корового происхождения, генезис которого связан с процессами метаногенерации (рис. 1б). Генетическая связь избыточного азота с процессами преобразования органического вещества также подчеркивается обратной зависимостью значений $\delta^{15}N$ в N_2 и $\delta^{13}C$ в CO_2 .

Определения *изотопного состава углерода в CH_4* показали, что значения $\delta^{13}C$ меняются от $-63,1$ до $-17,2$ ‰. Наиболее высокие значения $\delta^{13}C$ ($\delta^{13}C = -35,0 \dots -17,2$ ‰) встречены в газах источников, располагающихся вблизи вулкана Эльбрус (табл. 1). Для этих газов также характерны высокие значения $^3He/^4He = 300 \dots 630 (\times 10^{-8})$ (Polyak et. al, 2000; Лаврушин, 2012).

Такая локализация газов, богатых изотопно-тяжелым метаном, на первый взгляд позволяет предполагать вулканогенный генезис CH_4 .

Однако такому метану почти всегда сопутствует азот с положительными значениями $\delta^{15}N$ (табл. 1), который генетически связан с процессами преобразования органического вещества. Последнее может косвенно указывать на коровый (не вулканогенный) генезис метана с высокими значениями $\delta^{13}C$. Мы считаем, что плиоцен-четвертичная магматическая активность не вносит существенного вклада в вещественный баланс метана, присутствующего в углекислых газах.

Таблица 1. Изотопные характеристики N_2 , CO_2 и CH_4 в газах Эльбрусской и Казбекской вулканических областей

| Название источника | $\delta^{15}N$ N_2 , ‰ | CH_4 % об. | $\delta^{13}C$ ‰ (PDB) | |
|--|--------------------------------|-----------------|------------------------|----------------|
| | | | CO_2 | CH_4 |
| Эльбрусская область | | | | |
| нарзан Джан-Туган | - | 0,57 | -9,4 | -31 |
| нарзан Адыл-Су | -0,1 | 1,25 | -6,2 -7,1 | -22 -24,4 |
| нарзан Шхельда | - | 1,11 | -6,8 | -17,2 |
| Тер кол, нарзан | 1,6 | 0,22 | -10,8 | -19,7 |
| нарзан Уллукам нижний | - | 14,94 | -7,1 -9,4 | -53,5 -61,4 |
| нарзан Ледниковый, зап.склон в.Эльбрус | 0,6 | 1,56 | -6,4 -11,8 | -36,8 -35 |
| Тырныауз, скв. пр.берег.р.Баксан | 5,6 | 2,33 | -9,4 -11,6 | -56,5 -63,1 |
| Тырныауз, скв. на лев. берегу р.Баксан | 4,5 | 0,53 | -10,6 | -24,1 |
| Домбай, скв. | 2,3 | 12,42 | -9,8 -15,4 | -56,2 -55,6 |
| ист. Местия | -0,3 | 0,37 | -3,4 | -54,2 |
| Казбекская область | | | | |
| ист. в с.Сиони | -1 | 0,35 | -7,9 | -54,3 |
| с.Кетриси, скв. | -0,8 | 0,71 | -3,6 | -63,1 |
| Надибани, скв. | 0,5 | 0,29 | -4 | -52 |
| Пасанаури скв. | +2,4 | 29,9 | -11 | -34,5 |
| Нижний Кармадон, скв. | 1,3 | 41,79 | -11,9 | -26,1 |

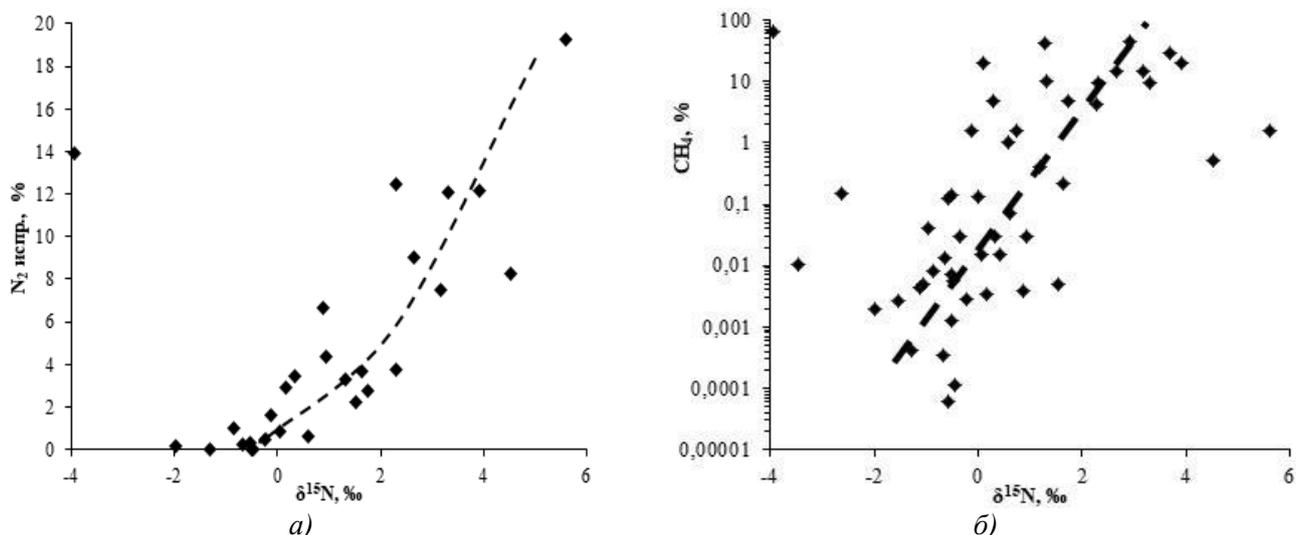


Рисунок 1 – Взаимотношение значений $\delta^{15}\text{N}$ в N_2 с концентрациями азота ($N_{2\text{испр.}}$ – за вычетом атмосферного воздуха) (а) и метана (б) в газах углекислых вод Приэльбрусья и КМВ. Линиями показаны тенденции взаимоотношений рассматриваемых параметров

Однако она все же оказывает влияние через реакции изотопного обмена в системе « $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ » на изотопные характеристики CH_4 . Если предполагать наличие изотопного равновесия в системе « $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ », то наблюдаемые различия в величинах $\delta^{13}\text{C}$ в CH_4 и CO_2 (табл. 1) будут соответствовать температурам от ~ 300 до ~ 750 °C (Bottinga, 1969; Horita, 2001).

Выводы

1) Воды и газы Эльбрусской и Казбекской вулканических областей по композиции солевого и газового состава углекислых вод принципиально не различаются.

2) В углекислых газах Эльбрусской и Казбекской вулканических областей доминирует магматогенная углекислота. Вместе с тем по величине $\delta^{13}\text{C}_{\text{ср}}$ углекислота этих областей немного различается ($-8,3$ и $-7,3$ ‰, соответственно).

3) Показано, что на значения $\delta^{13}\text{C}$ в CO_2 в газах влияют литолого-геохимические особенности водовмещающих пород.

4) Впервые выполненные определения изотопного состава азота в газах минеральных вод показали, что значения $\delta^{15}\text{N}$ меняются в диапазоне от $-4,0$ до $+5,6$ ‰. Положительные значения $\delta^{15}\text{N}$ характерны для большинства скважинных газов района КМВ, газов Нижне-Кармадонского месторождения и отдельных источников Приэльбрусья. Особенностью химического состава этих газов является заметная (от 0,5 до 44 %) примесь метана. В этих газах рост значений $\delta^{15}\text{N}$ сопровождается ростом общей концентрации азота, что указывает на важную роль избыточного (неатмогенного, корового) азота в общем балансе N_2 .

5) Для углекислых источников Эльбрусского и Казбекского районов Северного Кавказа, в составе газовой фазы которых доминирует CO_2 ($>90\%$), характерны значения $\delta^{15}\text{N}$ от $-3,5$ до ~ 0 ‰. В них можно предполагать присутствие азота мантийного генезиса.

6) Показано, что «термогенный» метан ($\delta^{13}\text{C}$ до $-17,2$ ‰), встречающийся в газах Приэльбрусья, вероятно, генетически не связан с процессами глубинной дегазации магматогенных флюидных систем. Мы считаем, что такие характеристики метана являются следствием термального воздействия от Эльбрусской вулканической камеры на температурные условия разложения органического вещества и/или процессы изотопного обмена в системе « $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ ».

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ (проект № 18-17-00245).

Список литературы

1. *Богати́ков О.А.* Катастрофическая плейстоценовая и голоценовая активность вулканического центра Эльбрус (Северный Кавказ, Россия): события и хронология по данным ^{14}C , ЭПР и К-Аг датирования / *О.А. Богати́ков, И.В. Мелекесцев, А.Г. Гурбанов, Л.Д. Сулержицкий и др.* // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 3–17.
2. *Гуценко И.И.* Извержения вулканов мира М.:Наука, 1979. 475 с.
3. *Дислер В.Н.* Возможные направления эволюции углекислых вод и азотных терм областей новейшего горообразования // Бюллетень МОИП. 1971. Т. XLVI (3). С. 114-124.
4. *Лаврушин В.Ю.* Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления / Ред. Б.Г. Поляк. М.: ГЕОС. 2012. 348 с. (Тр. ГИН РАН; вып. 599).
5. *Милановский Е.Е.* Орогенный вулканизм и тектоника Альпийского пояса Евразии / *Е.Е. Милановский, Н.В. Короновский* М.: Недра, 1973. 279 с.
6. Углекислые минеральные воды Северного Кавказа (1963) / Ред. И.Я. Пантелеев. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 190 с.
7. *Polyak B.G.* Helium isotopes, tectonics and heat flow in the Northern Caucasus / *B.G. Polyak, I.N. Tolstikhin, L.E. Yakovlev, B. Marty, A.L. Cheshko* // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2000. № 64 (11). P. 1925–1944.
8. *Polyak B.G.* Mantle helium traces in the Elbrus–Kazbek sector of the Greater Caucasus and adjacent areas / *B.G. Polyak, V.Yu. Lavrushin, I.L. Kamensky* // *Chem. Geol.* 2009. 266. P. 57–66.
9. *Bottinga Y.* Calculated fractionation factors for carbon and hydrogen isotope exchange in the system calcite-CO₂-graphite-methane-hydrogen and water vapor // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* 1969. Vol. 33. P. 49–64.
10. *Horita J.* Carbon isotope exchange in the system CO₂-CH₄ at elevated temperatures // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2001. Vol. 65. P.1907–1919.

УДК 251.233.556.3

On the formation of the gas and chemical composition of nitrogen baths of the Paratunsky field

Larisa A. Vorozheykina, Natalia P. Asaulova, Natalia V. Obora

JSC Teplo Zemli
geolotdelkbgt@yandex.ru

There are data on the assumed lower crust origin of gas composition of the Paratunskoye field, based on the results of using analogs in the composition of gases of micro-inclusions in rocks and hydrothermes, as an indicator of P-T conditions of fluid origin, which give rise to hydrothermal activity. At the level of M-section, the fluid becomes water, and initial hydrothermes appear. As P-T conditions and geochemical medium rise and change, the fluid transformation continues, contributing to the emission of gases, typical for waters of the lower crustal fluid supply of nitrogen therms. Palingen magmas arising in this process serve as a temperature buffer that maintains an equilibrium energy state of the western and eastern parts of the Paratunskoye deposit, separated by the Central fault - rift in the stretching zone. The area of the deposit is considered within the limits of paleostructure of Paratunskaya depression of geothermal region of the same name.

Keywords: therms, Holocene, rift, deposit, resources, volcanism

О формировании газового и химического состава азотных терм Паратунского месторождения

Л.А. Ворожейкина, Н.П. Асаулова, Н.В. Обора

АО «Тепло Земли» п. Термальный Камчатский край, 684035

Приведены данные о предполагаемом нижнекоровом происхождении газового состава азотных терм Паратунского месторождения, по результатам использования аналогов в составе газов микровключений в породах и гидротермах, как индикатор Р-Т условий зарождения флюидов, дающих начало гидротермальной деятельности. На уровне М-раздела флюид становится водным, появляются инициальные гидротермы. По мере подъёма и изменения Р-Т условий и геохимической среды трансформация флюида продолжается, способствуя выделению газов, характерных для вод нижнекорового флюидного питания азотных терм. Возникающие при этом палингенные магмы выполняют роль температурного буфера, поддерживающего равновесное энергетическое состояние западной и восточной частей Паратунского месторождения, разделённых Центральным разломом – рифтом в зоне растяжения. Площадь месторождения рассмотрена в границах палеоструктуры Паратунской впадины одноимённого геотермального района.

Ключевые слова: термы, голоцен, рифт, месторождение, ресурсы, вулканизм

Наиболее общие закономерности генезиса гидротерм отражены в их газовом составе. (Иванов, 1960, 1961). Традиционно формирование азотных терм объясняли нагревом инфильтрационных вод, проникающих на глубину, под влиянием регионального кондуктивного теплового потока; газовый состав соотносили с атмосферным воздухом. Однако изотопные отношения He^3/He^4 в азотных термах Исландии свидетельствуют об участии в нагреве этих вод глубинных теплоносителей.

Иной взгляд на формирование газа азотных терм предложен Е.А. Вакиным, Ф.Ш. Кутыевым на основании аналогии в составе газов включений базит-гипербазитовых ксенолитов и газового состава гидротерм. По результатам многочисленных анализов (\geq более 1500) исследователи пришли к выводу, что газовый состав природных термальных вод обусловлен глубиной, с которой эти газы поступают. Так, область флюидного питания наиболее высокотемпературных *водородных* терм находится в верхней мантии, *азотных* – в нижней коре, *углекислых* – в верхней коре. Другими словами, газовый состав гидротерм предопределён трансформацией характером разломов, запечатывание которых происходит снизу [1].

Относительно азотных терм авторы исследований обратили внимание на тот факт, что «где-то на уровне М-раздела флюид становится водным, то есть появляются *инициальные гидротермы*». По мере подъёма и изменения Р-Т условий, геохимической среды трансформация флюида продолжается. В процессе термометаморфизма, доходящего до селективного плавления, высвобождаются содержащиеся в породах (биотитах, амфиболах и др.) вода и газы, характерные для корового флюидного питания (N_2 , CO_2 , HCl , HF и др.). Возникающие при этом *очаги палингенных магм* служат своеобразным температурным буфером: поступающее в них тепло расходуется не на повышение температуры, а «на увеличение объёма очага за счёт плавления вмещающих пород» [1].

В этом случае флюид перестаёт быть чисто ювенильным, так как плавлению подвергаются водосодержащие минералы и породы, насыщенные водой, которая может иметь и поверхностное происхождение. Тепловые параметры апикальных частей очагов уже *магматического флюида* должны отвечать Р-Т условиям существования расплава на данной глубине.

На Камчатке проявления азотных терм закономерно прослеживаются по периферии долгоживущих магматических центров, нередко проявлено в грабеновых структурах вулканических зон. Азотные термы региона тесно сопряжены с вулканической и плутонической деятельностью полуострова. В Исландии воды этого типа образуют основные месторождения вблизи Рейкьявика, но распространены по всей площади дочетвертичных платобазальтов. Несмотря на различие геолого-тектонических особенностей Камчатки и

Исландии вариации их химического, газового состава идентичны, что свидетельствует о возможной общности схемы формирования термальных вод, несмотря на разницу геолого-структурных особенностей вулканических структур.

Горячие природные воды теснейшим образом связаны с вулканической и плутонической активностью, но характер такой связи до сих пор не установлен, ввиду того, что скважинами изучена только верхняя часть гидротермальных объектов, в отличие от энергоёмких глубинных теплоносителей – флюидов.

Химический состав

По классификации В.В. Иванова (1955–1965 гг.) Паратунские термы относятся к азотным щелочным типично инфильтрационным водам атмосферного происхождения, ионно-солевой состав которых формируется за счёт выщелачивания разнообразных вулканических и вулканогенно-осадочных пород, а условия циркуляции определяются молодыми, глубоко проникающими тектоническими разломами. Г.М. Власов (1954) относил их к метаморфизованным хлоридно-щелочным термам (азотно-углекислым по Иванову).

Бесспорно, что в общем случае на формирование химического состава и минерализацию подземных вод влияют: состав и минерализация атмосферных осадков, состав и характер проницаемости пород, температура воды, степень промытости горных пород, скорость водообмена. В вулканических районах неизбежно влияние эндогенных эманаций, благодаря которым термальные воды содержат Ni, Co, Zn, Pb, Cd, Ga, Bi, Sr, Br, I, Y с возрастающей концентрацией в направлении от Верхнепаратунского участка к Нижнему (Чудаев, 2002) [4].

Среди значимых корреляций между элементами термальных вод Паратунского месторождения отмечается прямая связь фтора с хлором, молибденом, германием, литием и бором, бромом, бора с хлором. Обычно увеличение хлора сопровождается увеличением концентрации бора, *за исключением участка Нижнего*, что свидетельствует о *других условиях поступления бора и хлора* на этом участке. Среди основных элементов отмечается связь натрия с калием и сульфатом, кальция с сульфатом и стронцием; обратная связь кальция с гидрокарбонат-ионом. Кислотно-щелочные свойства вод во многом определяют поведение отдельных элементов.

Газовый состав

Согласна данным Ю.А. Тарана (1988) газовая фаза Паратунского месторождения содержит в основе азот (до 99%) и первые проценты углекислого газа. Анализ инертных газов (Каменский и др., 1986) показал, что доля мантийного гелия достигает 23%. Данные, полученные по изотопии углерода углекислого газа (скв. 1), имеют значение $^{13}\text{C} = -7\text{‰}$ [4].

Изотопы кислорода и водорода

Как показали работы предшественников – (Серёжников, Селецкий – 1982), Кононов (1983), Чешко (1991), Чудаев (2002), Кирюхин (2020), исходной водой для Паратунского месторождения являются метеорные воды. Все величины соотношения изотопов речных, грунтовых и термальных вод располагаются вдоль линии метеорных вод, указывая на их единый источник. На большом фактическом материале показано, что формирование инфильтрационных вод месторождения происходит преимущественно на отметках порядка 1500 м (Кирюхин, 2020) [3].

Температурные условия

Критический обзор использования гидрохимических количественных геотермометров показал, что для гидротерм Паратунского месторождения наиболее приемлемым является Si-геотермометр. По T_{Si} установлено, что максимальные значения базовой температуры наиболее характерны для Нижнего участка месторождения ($T_{\text{Si}} = 136 \text{ °C}$ в скв. РЭ-7). В общем плане прослежено снижение базовых температур от Нижнего участка в радиальных направлениях. Предположительно, это обусловлено наличием на площади Нижнего участка палингенного магматического очага. По результатам гидрохимического мониторинга вслед за увеличением водоотбора природного теплоносителя скважинами восточной части

месторождения в 2014 г. последовал прогрев всей площади месторождения – при этом показания T_{Si} увеличились на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ по сравнению с предшествующим периодом. Одновременно с возрастанием активности циркуляции термальных вод увеличилось показание геотермического коэффициента $f = T_{Si}/T_{TNa-K-Ca}$. Обычно значения плагиоклазового геотермометра превышали показания T_{Si} , а в данном случае – наоборот. Следует отметить, что аналогичная «картина» наблюдалась в 2006 г. в период активизации насосной эксплуатации скважин Промежуточного участка, взаимодействующего со Средним вдоль разлома Западного.

Возможной причиной вышеупомянутых явлений мог послужить палингенный магматического очаг, расположенный в пределах рифтовой зоны Центрального разлома на участке Нижнем. Предположительно он выполняет роль *температурного буфера* между западным и восточным флангами Паратунского месторождения, имеющими разнонаправленные сместители относительно рифта Центральной зоны разлома (Серёжников, Зимин, 1976) [2]. При нарушении теплового баланса между западной и восточной частями месторождения провоцируются процессы, ведущие к гармонизации теплового баланса. Так, в 2014 г. наблюдались процессы термометаморфизма скважин западного фланга месторождения, связь которого с глубинами была и ранее проявлена: наличие рудной аномалии (Серёжников, 2000), дайки у горста Тополового, установленной геофизическим методом (Сидоров, 1995) [3].

Состав термальных вод в западной части месторождения сульфатный с минерализацией до $1,2\text{ г/дм}^3$, в восточной – преимущественно хлоридно-сульфатный с минерализацией до 3 г/дм^3 . Для участков Северный, Нижний проявлено влияние подземных вод Южнобережной площади. По отдельным скважинам Паратунского месторождения прослежено увеличение содержания бора, – возможно, сказалось влияние подземных вод Паратунско-Налычевской депрессии (Соколов, 1995) [3].

Более уверенно отследить гидрохимические особенности термальных вод на площади месторождения помогают генетические коэффициенты (качественные геотермометры), как это видно на Рис. 1.

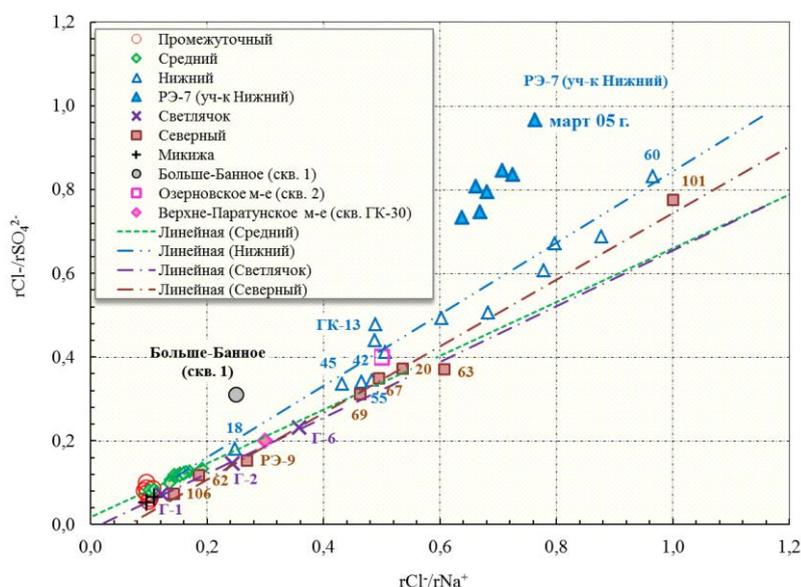


Рисунок 1 – Соотношение основных генетических коэффициентов, осреднённых по всем скважинам Паратунского месторождения (период 1964–2018 гг.)

На представленном графике видно, что большинство скважин объединяют параметры глубинных вод скважины 101. Исключением являются скважины РЭ-7, ГК-13, 102, 42 и др., связанные с наиболее глубоко проникающими трещинами зонами Центрального разлома и дуговым разломом палеоструктуры Паратунско-Быстринской ВТС. К этой же ветви графика тяготеют отдельные скважины Большебанного (скв. 1), Озерновского (скв. 2) месторождений. Предположительно вышеперечисленные геотермальные объекты объединяет общность схемы

формирования химического состава термальных вод. Относительно соседнего Большебанного месторождения подмечено, что «зоны контактов базальтовых даек, как и субвулканических даек липаритов и дацитов, с вмещающими породами служат *хорошо проводящими каналами* для высокотемпературных гидротерм». Дайка СВ ориентировки способствовала транзиту перегретых вод (T до $171,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) [2]. Относительно химического состава термальных вод скважины 2 Озерновского месторождения предполагалось влияние паровой фазы перегретых вод Паужетского месторождения на грунтовые воды (Петров, 1989).

Список литературы

1. Вакин Е.А. Глубины генерации флюидной составляющей современных гидротерм / Е.А. Вакин, Ф. Ш. Кутыев // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. М.: Наука, 1979.
2. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976.
3. Ворожейкина Л.А. ТЭО кондиций и подсчёт эксплуатационных запасов теплоэнергитических вод Паратунского геотермального месторождения по результатам эксплуатационной разведки за период 2003–2018 гг. по состоянию на 01.01.2019 г. АО «Тепло Земли» / Л.А. Ворожейкина, Н.П. Асаулова, Н.В. Обора и др. п. Термальный. 2020 г.
4. Чудаев О. В. Геохимия и условия формирования современных гидротерм зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану: автореф. дис. на соиск. уч. ст. д-г-м н. 2002 г.
5. Kiryukhin A. V., Vorozheikina L. A., Voronin P. O., Kiryukhin P. A. Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia. *Geothermics*. 2017. Vol. 70. P. 47–61.
6. Kiryukhin A. V., Yampolsky V. A. Modeling study of the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia. *Geothermics*. 2004. № 33. P. 421–442.

УДК 556.3

Chemical and Isotopic Composition of Mineral Waters of Essentuki Mineral Waters Field

Ekaterina Baranovskaya¹, Natalia Kharitonova^{1,2}, Elena Fillimonova¹, Alexey Maslov¹, Anna Korzun¹, Elena Maximova¹, Natalia Muromets¹

¹*Geology Faculty, Moscow State University, Moscow, Russia
baranovskaya_kat@mail.ru*

²*Far East Geological Institute Far East Branch of Russian Academy of Sciency (FEGI FEB RAS),
Vladivostok, Russia*

The Caucasian Mineral Water (CMW) region is a unique natural area where carbon dioxide mineral waters with different chemical composition and balneological properties have formed. The report reviews the current results of hydrogeochemical and isotopic studies of carbon dioxide mineral waters of the Essentuki field, located in the central part of the CMW region and characterized by a wide variety of water types. At the same time, the most interesting are carbonated sodium bicarbonate-chloride waters, widely known as «Essentuki 4» and «Essentuki 17», which have long been used in balneology and for bottling as healing waters. The great variety of waters in terms of ion and gas composition, formation conditions and their healing properties is explained by the complex hydrogeological conditions of the Essentuki field, which is located on a large area and includes several aquifers with different hydrogeodynamic and hydrogeochemical conditions, geothermal conditions, modern magmatism, fracture zones.

Keywords: mineral water, carbon dioxide water, hydrochemistry, composition, CMW region, Essentuki mineral waters field

Химический и изотопный состав минеральных вод месторождения Эссентуки

Е.И. Барановская¹, Н.А. Харитонова^{1,2}, Е.А. Филимонова¹, А.А. Маслов¹, А.В. Корзун¹,
Е.С. Максимова¹, Н.Н. Муромец¹

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия

Регион Кавказских Минеральных Вод (КМВ) представляет собой уникальный природный объект, где сформировались различные по химическому составу и бальнеологическим свойствам углекислые минеральные воды. В докладе рассматриваются современные результаты гидрогеохимических и изотопных исследований углекислых минеральных вод Эссентукского месторождения, расположенного в центральной части региона КМВ и отличающегося большим разнообразием типов вод. При этом наибольший интерес представляют углекислые гидрокарбонатно-хлоридные натриевые воды, широко известные, как «Эссентуки 4» и «Эссентуки 17», которые издавна используются в бальнеологии и для розлива в качестве лечебно-столовых.

Большое разнообразие вод по ионному и газовому составу, условиям формирования, и их лечебным свойствам объясняется сложными гидрогеологическими условиями Эссентукского месторождения, которое располагается на большой площади и включает в себя несколько водоносных горизонтов с различными гидрогеодинамическими и гидрогеохимическими условиями, геотермическими условиями, современным магматизмом, наличием многочисленных разрывных нарушений и зон повышенной трещиноватости.

Ключевые слова: минеральные воды, углекислые воды, гидрохимия, состав, Регион Кавказских Минеральных Вод (КМВ), Эссентукское месторождение

Введение

Эссентукское месторождение отличается большим разнообразием типов минеральных вод. В то же время наибольший интерес представляют углекислые гидрокарбонатно-хлоридные натриевые воды, широко известные, как «Эссентуки 4» и «Эссентуки 17», распространенные в верхнемеловых и палеогеновых отложениях, которые издавна используются в бальнеологии, а также для розлива в качестве лечебно-столовых. В связи с высокими лечебными свойствами этих углекислых вод, курорт Эссентуки очень быстро приобрел широкую известность в России, а воды аналогичного состава, встречающиеся в других местах, стали называться водами «эссентукского» типа.

Воды «эссентукского» типа – соляно-щелочные (бессульфатные) углекислые, характеризуются приблизительно равным содержанием гидрокарбонат- и хлор-ионов. По данным исследователей, эти воды формируются за счет смешения углекислых вод (юрских отложений) и собственных безуглекислых пластово-трещинных вод верхнего мела.

Воды типа «Эссентуки 4» содержат растворенную углекислоту в количестве 1,6-2,7 г/дм³, минерализация составляет от 8,5 до 9,4 г/дм³, рН 6,6-6,8. Формула химического состава представлена (1):

$$CO_2 1,6M_{8,8} \frac{HCO_3 59Cl 41}{(Na + K) 92Mg 4Ca 2} \text{ рН } 6,7 \text{ t } 12,5^\circ C \quad (1)$$

Воды типа «Эссентуки 17» в центральной части Эссентукского месторождения содержат углекислоту в количестве 1,8-2,6 г/дм³, минерализация этих вод изменяется от 10,1 до 13 г/дм³, рН 6,8-7.

Формула химического состава (2):

$$CO_2 1,86M_{12,5} \frac{HCO_3 59Cl 41}{(Na + K) 93Ca 5Mg 2} \text{ рН } 7 \text{ t } 14,2^\circ C \quad (2)$$

Основные лечебные свойства этих вод обусловлены высокой концентрацией содовой составляющей – около 60 %.

Такие минеральные воды используют для наружного и внутреннего применения, имеющие широкий спектр лечебных показателей. Показаниями для направления на курорты с углекислыми ваннами являются болезни системы кровообращения, также при внутреннем применении, воды благоприятно влияют на работу органов ЖКТ, в частности, на желудок, печень и почки.

Геологическое строение

Ессентукское месторождение минеральных вод находится в центральной части региона КМВ, расположенного в северо-восточной части Минераловодского предгорного артезианского бассейна, представленного чередованием слоёв карбонатно-терригенных отложений мезо-кайнозойского возраста, которые постепенно погружаются в северо-восточном направлении и содержат подземные воды различного состава и физико-химических свойств. Областью питания подземных вод бассейна являются южная горная часть и кристаллический фундамент, а областью транзита и их бокового оттока за границу бассейна – северный и северо-восточный районы. По многочисленным разрывным нарушениям, а также зонам повышенной трещиноватости происходят внутренние, меж- и внутрипластовые перетоки подземных вод. По тектонически ослабленным зонам на локальных участках осуществляется разгрузка подземных вод на поверхность земли. Основными продуктивными водоносными комплексами являются:

Нижне-среднеюрский (J_1-J_2) - представлен песчано-глинистыми отложениями. Выклинивается вблизи южной границы Кисловодского месторождения. Остальные комплексы в районе КМВ имеют региональное распространение.

Титон-валанжинский ($J_{3tt}-K_{1v}$) - представлен загипсованными глинами, гранитной дресвой и известняками (титон), в верхней части – доломитизированными известняками (валанжина).

Нижнемеловой (аптско-нижнеальбский – K_{1a-al}) комплекс – терригенный, сложен песчано-глинистыми отложениями.

Верхнемеловой (K_2) – карбонатный, сложен известняками и мергелями. В районе Ессентуков он объединяется с водоносными комплексами ранне-палеогенового возраста, сложенного преимущественно мергелями ессентукской свиты.

Подстилающие осадочный чехол породы кристаллического фундамента палеозойского возраста считаются малоперспективными для обнаружения месторождений минеральных вод. Несмотря на большое количество скважин, достигших фундамента, водопритоков из них получено не было. Тем не менее, по мнению многих исследователей из них и происходит инжекция углекислоты в вышеописанные водоносные горизонты.

Химический и изотопный состав

Рассмотрение содержания специфических компонентов в минеральных водах (газы, микроэлементы, радиоэлементы, органическое вещество, щелочность и кислотность) позволяет охарактеризовать химический состав и типы ценных минеральных вод района Ессентукского месторождения.

В северной части Ессентукского месторождения минеральные воды приурочены к верхнемеловому водоносному горизонту, вскрыты скважиной на глубине порядка 679 м. Воды горизонта в рассматриваемом районе соляно-щелочные, близкие к типу «Ессентуки 4» – хлоридно-гидрокарбонатные натриевые с минерализацией 6,8-7,0 г/дм³, практически безуглекислые. Газовый состав – метаново-азотно-углекислый. Воды содержат в повышенных концентрациях йод (3,2 мг/дм³), бром (5 мг/дм³), борную кислоту (68 мг/дм³), фтор (3 мг/дм³).

На востоке Ессентукского месторождения воды характеризуются хлоридно-гидрокарбонатно-натриевым составом, с минерализацией 2,4-2,6 г/дм³, без специфических компонентов и свойств, с повышенным содержанием фтора от 2 до 6 мг/дм³. Температура воды на устье – 28-30 °С. Воды приурочены к датско-зеландскому (эльбурганскому) водоносному горизонту.

В южной части месторождения, минеральные воды приурочены к верхнемеловому водоносному горизонту и являются безуглекислыми слабоминерализованными, гидрокарбонатного натриевого состава, со щелочной реакцией, холодные. Воды подобного состава, как правило, используются в питьевых целях, в том числе и для промышленного розлива в бутылки в качестве природных столовых вод.

В пределах юго-западной части Эссентукского месторождения, единственным продуктивным на углекислые минеральные воды является титонско-валанжинский водоносный горизонт, залегающий непосредственно на палеозойском фундаменте. Здесь распространены углекислые воды гидрокарбонатного типа, а также смешанного сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатного. В катионном составе вод преобладают кальций и натрий. Минерализация вод составляет 6,2-7,9 г/дм³, достигая 11,5 г/дм³ из-за чрезвычайного перенасыщения вод углекислотой (газовый фактор по скважине в начальный период опытного выпуска превышал 1000 дм³/дм³).

В северо-центральной части Эссентукского месторождения продуктивным на минеральные воды является верхнемеловой водоносный горизонт и водоносная пачка песчаников, залегающих в средней части танетского относительно водоупорного горизонта, к которым приурочены метановые высокоминерализованные (19-20 г/дм³) хлоридные натриевые воды с повышенным содержанием брома (20-70 мг/дм³), йода (3-11 мг/дм³) и борной кислоты (41-96,7 мг/дм³). Подземные воды верхнемелового водоносного горизонта по химическому составу хлоридно-гидрокарбонатные, типа «Эссентуки 4» и гидрокарбонатно-хлоридные типа «Эссентуки 17» натриевые воды с минерализацией от 7,5-8,4 до 12,1-13,3 г/дм³.

В центральной части Эссентукского месторождения минеральные воды приурочены к датско-зеландскому (эльбурганскому) и верхнемеловому водоносным горизонтам. К эльбурганскому горизонту приурочены углекислые холодные хлоридно-гидрокарбонатные натриевые средне- и высокоминерализованные питьевые и лечебно-питьевые воды «Эссентуки 4» и «Эссентуки 17». Содержание углекислоты в воде типа «Эссентуки 17» составляет от 1,7 до 2 г/дм³, минерализация 11,6-12,5 г/дм³, рН 6,3-7,35. Воды типа «Эссентуки 4» содержат углекислоту в количестве 0,67-1,1 г/дм³, минерализация их от 8,2 до 8,8 г/дм³, рН 6,2-6,7.

По химическому составу воды верхнемелового водоносного горизонта – углекисло-сероводородные, хлоридно-гидрокарбонатные натриевые, теплые, мало- и среднеминерализованные (3,2-5,8 г/дм³). Содержание углекислоты в них от 0,63 до 1 г/дм³, сероводорода 17-19,4 мг/дм³, их рН 6,4-6,6. По газовому составу верхнемеловые воды близки к углекисло-сероводородным водам Пятигорского месторождения, а по химическому составу это типичные соляно-щелочные «эссентукские» воды, но с более низкой минерализацией.

Изотопный состав кислорода воды ($\delta^{18}\text{O}$) варьирует в диапазоне от $-14,3$ до $-7,4$ ‰, а *водорода* – от -100 до -63 ‰. Для $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ отмечаются зависимости прямого характера с концентрациями Cl , HCO_3 , Ca , Mg , Na , отражающие процесс смешения изотопно-легких по кислороду пресных (вероятно, атмосферных) и минерализованных вод с более высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$. Последние, скорее всего, могут иметь седиментационный генезис.

Такое разнообразие минеральных вод в районе Эссентуков объясняется сложными гидрогеологическими условиями Эссентукского месторождения, которое располагается на большой площади и включает в себя несколько водоносных горизонтов с различными гидрогеодинамическими и гидрогеохимическими условиями.

Список литературы

1. *Иванов В.В.* Кавказские минеральные воды М.: Изд. ЦНИИКФ, 1972. Т. 21. 158 с.
2. *Лаврушин В.Ю.* Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления /Отв. ред. Б.Г. Поляк М.: ГЕОС. 2012. 348 с. (Тр. ГИН РАН; Вып. 599).
3. *Лаврушин В.Ю.* Генезис Эссентукского месторождения углекислых вод (Северный Кавказ) / В.Ю. Лаврушин, А.Б. Лисенков, А.С. Айдаркожина // Геохимия. 2020. Т. 65, № 1. С. 77–91.

4. *Потапов Е.Г.* История изучения углекислых минеральных вод Эссентукского месторождения / Е.Г. Потапов, С.Р. Данилов // Курортная медицина. 2012. № 3. С. 9–12.

5. *Filimonova E.* Hydrogeology and hydrogeochemistry of mineral sparkling groundwater within Essentuki area (Caucasian mineral water region) / E. Filimonova, V. Lavrushin, N. Kharitonova et al. // Environ Earth Sci. 2020. P. 79, 15, DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8721-2>.

УДК 550.341.5

Hydrodynamic model of nitrogen thermal water formation in crystalline massifs on the example of Kuldur spa

Larisa A. Lyamina^{1,2}, Alexandr V. Rastorguev², Rostislav S. Shtengelov², Natalia A. Kharitonova^{2,3}

¹*Geological institute RAS, Pyzhevsky lane 7, Moscow, 119017, Russian Federation
lyamina-96@list.ru*

²*Department of Hydrogeology, Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye Gory, 1, Moscow, Russian Federation*

³*Far East Geological Institute FEB RAS, prospect 100letya 159, Vladivostok, 690022, Russian Federation*

Thermal water outlets are surface manifestations of deep groundwater circulation systems. Having an idea of the spatial structure of the flow in the fault zones, its intensity, the nature of groundwater circulation in the crystalline massif, it is possible to make the right decisions in the development and/or protection of thermal water resources, as recently increased interest in the operation of «green energy». The aim of this paper is to build a two-dimensional numerical model of filtration and heat and mass transfer of fluid from deep horizons of the earth's crust to the surface by vertical breakup. The numerical solution of the problem was carried out on the basis of the FEFLOW program code, which is based on the finite element method (FEM).

Keywords: nitrogen thermal waters, isotopes, Kuldur spa, geothermometers, hydrodynamical model

Гидродинамическая модель формирования азотных термальных вод в кристаллических массивах на примере месторождения Кульдур

Л.А. Лямина^{1,2}, А.В. Расторгуев², Р.С. Штенгелов², Н.А. Харитонова^{2,3}

¹*Геологический Институт РАН, Москва, Россия*

²*Каф. Гидрогеологии, геологический ф-т МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

³*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия*

Выходы термальных вод представляют собой поверхностные проявления глубоких систем циркуляции подземных вод. Имея представление о пространственной структуре потока в зонах разлома, его интенсивности, характере циркуляции подземных вод в кристаллическом массиве, возможно принятие правильных решений при разработке и/или охране термальных водных ресурсов, так как в последнее время значительно возрос интерес к эксплуатации «зеленой энергии». Целью настоящей работы является построение двухмерной численной модели фильтрации и теплопереноса флюида из глубоких горизонтов земной коры к поверхности по вертикальному разрывному нарушению. Численное решение задачи было выполнено на основе программного кода FEFLOW, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ).

Ключевые слова: азотные термальные воды, изотопы, месторождение Кульдур, геотермометры, гидродинамическая модель

Введение

Область исследования располагается на территории поселка Кульдур Облученского района Еврейской автономной области в 100 км от города Биробиджан и на высоте 365 м над уровнем моря с географическими координатами – 49°15' с.ш. и 131°31' в.д (Рис. 1).

Кульдурские термы, как и термы многих других провинций термальных вод областей молодых тектонических разломов, связаны с крупной зоной тектонического дробления в гранитном массиве ($\gamma\delta_2C_{2-3t}$). Кульдурское месторождение термальных вод приурочено к зоне Меридионального разлома на участке пересечения оперяющего его нарушения северо-восточного направления, круто ($70-85^\circ$) падающего на восток (Lyamina et al, 2020). Естественные выходы азотных терм наблюдаются на Термальной площадке, размером 150×150 м, а также вдоль долины реки Кульдур, где термальные воды выходят в различных местах из-под аллювия в виде небольших ключей. Питание азотных термальных вод происходит, в основном, за счет инфильтрации атмосферных осадков.

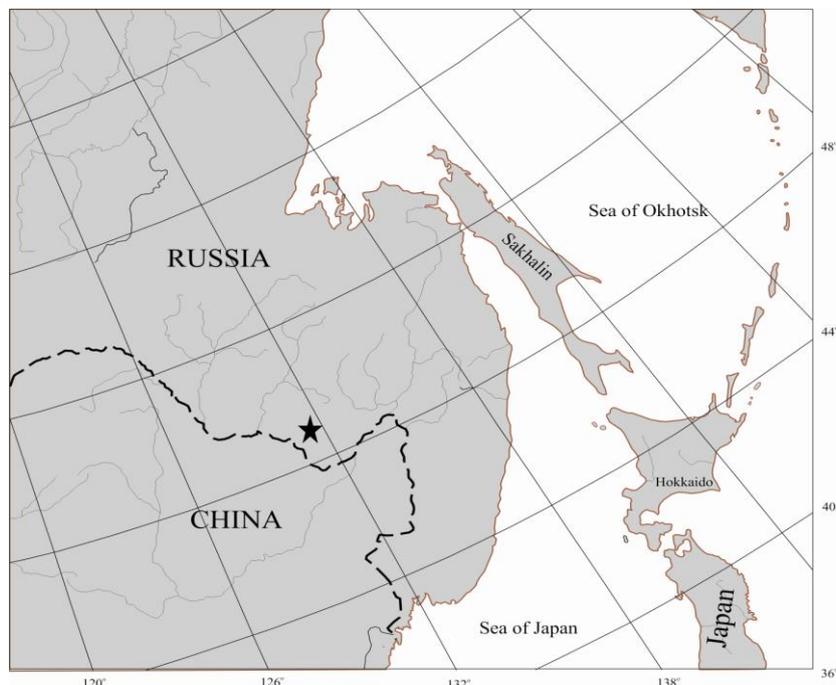


Рисунок 1 – Район расположения месторождения термальных вод Кульдур

Объекты и методы

На Термальной площадке месторождения функционируют с 1987 года две эксплуатационные скважины 1-87 и 2-87 расположенные непосредственно в водоподводящей зоне разлома и имеющие самые высокие температуры ($71-72^\circ C$), а также наибольший дебит (9,67 л/с), что позволяет выделить эту часть термального поля как центральную зону. Наибольшие напоры в районе скважин 1-87 и 2-87 свидетельствуют о том, что эти скважины перехватывают основной поток терм, восходящий по зоне тектонического разлома. Вода из этих скважин используется и для лечения и для теплофикации помещений санатория. Скважины 3-87, 3-51 и 5-51 используются для режимных наблюдений, водоотбор из них не производится.

Слабо минерализованные азотно-щелочные, кремнистые термы Кульдур являются типичными представителями вод выщелачивания кристаллических пород: невысокая минерализация в диапазоне от 0,3 до 0,4 г/л, высокая температура – $73^\circ C$, pH до 9 и химический состав: $HCO_3(CO_3)-Na$ и SO_4-Na . Воды обогащены фтором (до 20 мг/л), кремнием (до 60 мг/л H_2SiO_3 и более), алюминием (до 10 мг/л и более), вольфрамом, молибденом и рядом других анионогенных элементов.

В составе газов в основном содержится азот (99,5 %), в незначительном количестве присутствуют метан и тяжелые углеводороды (0,5 %).

На месторождении Кульдур был произведен целый комплекс геологических и гидрогеологических исследований. В ходе проведения трех полевых экспедиций в 2015, 2018 и 2019 гг. были отобраны пробы из термальных скважин, реки Кульдур и атмосферных осадков для исследования химического, изотопного и газового состава.

Численное решение задачи было выполнено на основе программного кода Feflow (Diersch H. J. G, 2014), в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Неортогональная разбивка сетки позволяет более подробно учесть зону разрывного нарушения, русло реки Кульдур, являющееся дренажом для термальных вод.

Из-за недостаточной изученности и сложности геологического строения района двухмерная профильная модель подразделялась на три зоны: а) зона термовыводящего канала, приуроченная к разрывному нарушению; б) зона повышенной терциноватости и в) зона монолитных скальных пород. Каждая из зон в данной постановке задачи принимается однородной (Hiscock K., 2005).

На верхней границе модели задается инфильтрационное питание (ГУ 2-го рода). Нижняя граница модели проведена на глубине 4500 м, что соответствует максимальной глубине формирования термальных вод. Нижняя и боковые границы непроницаемы. В ходе усовершенствования модели будет задаваться тепловой поток для расчета тепло-массопереноса в моделируемой области.

В данной работе рассматривается два варианта модели: 1) без учета разломной зоны и 2) с повышенным коэффициентом фильтрации в разломной зоне.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты расчетов структуры потока для варианта без учета разрывного нарушения в виде изолиний напоров даны на рис. 2. Изолинии возраста подземных вод для этого варианта приведены на рис. 3. Полученный возраст подземных вод вблизи курорта близок с результатами изотопных определений. Приведенные результаты показывают, что структура потока подземных вод в значительной степени контролируется питанием на водоразделах и разгрузкой в реку.

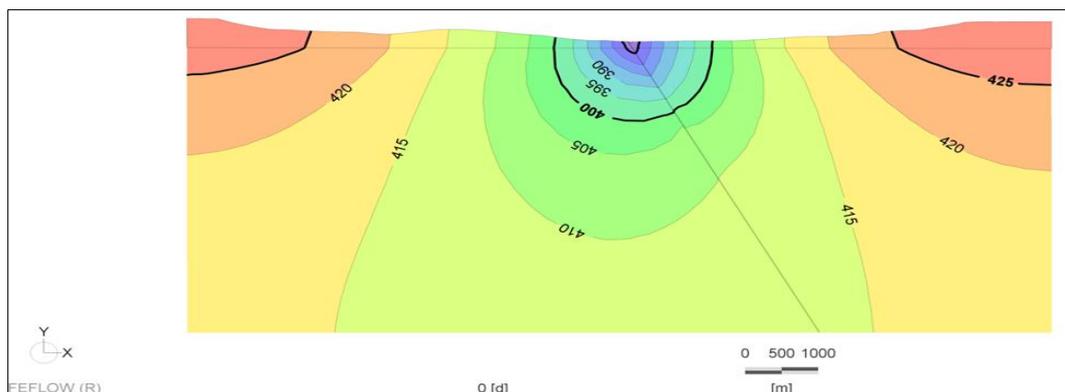


Рисунок 2 – Структура потока изолинии напоров без учета изменения фильтрационных свойств в пределах разрывного нарушения

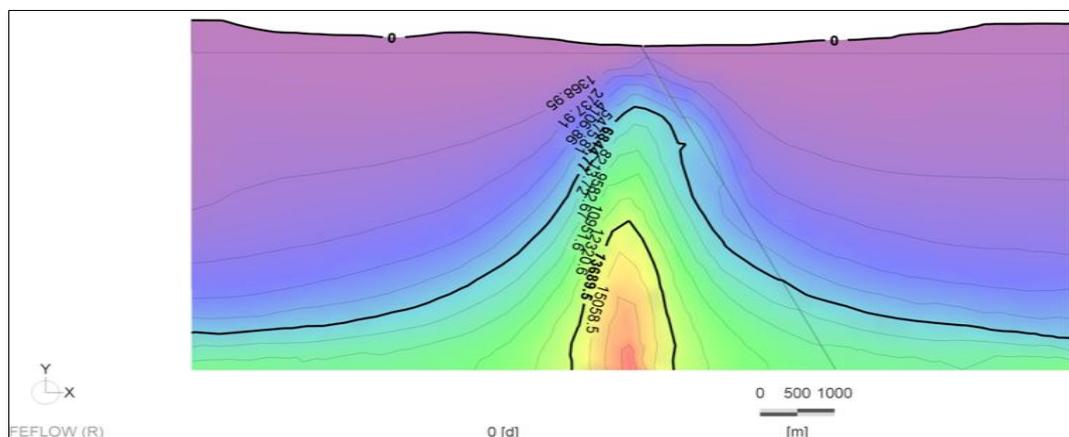


Рисунок 3 – Возраст подземных вод (годы), без учета изменения фильтрационных свойств в пределах разрывного нарушения

Второй расчетный вариант был выполнен с увеличенным до 1 м/сут коэффициентом в районе разрывного нарушения. Результаты расчетов структуры потока для варианта с повышенными фильтрационными свойствами в районе разрывного нарушения в виде изолиний напоров даны на рис. 3. Изолинии возраста подземных вод для этого случая приведены на рис. 4. Полученные результаты показывают, что разрывное нарушение способствует миграции вод большего возраста к земной поверхности.

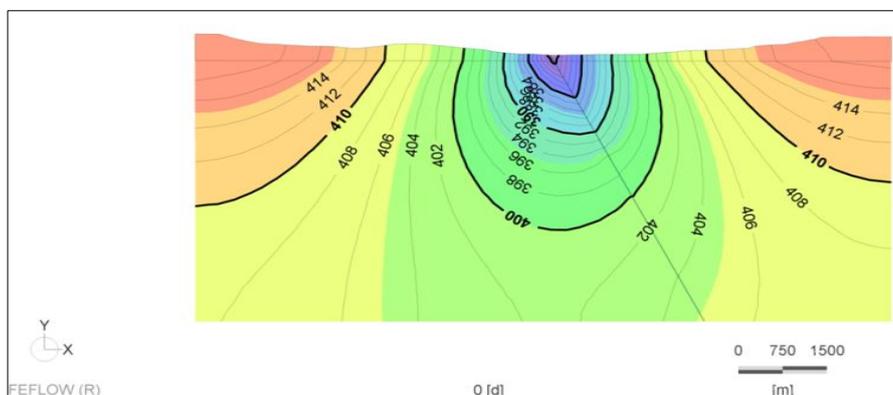


Рисунок 4 – Структура потока изолинии напоров с учетом изменения фильтрационных свойств в пределах разрывного нарушения

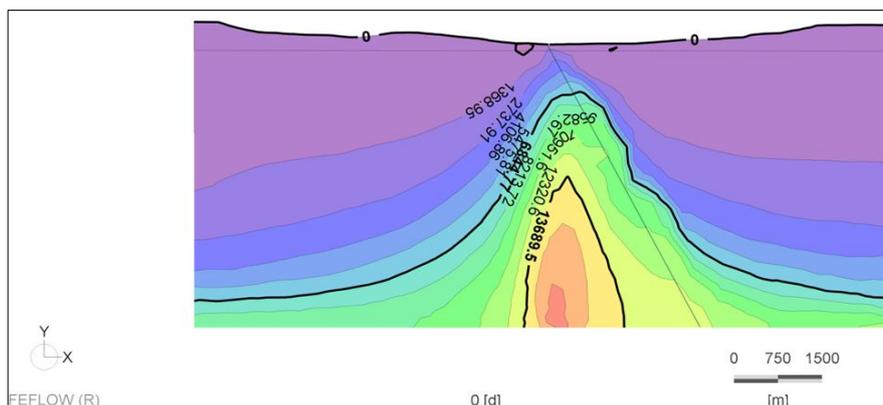


Рисунок 5 – Возраст подземных вод (годы), с учетом изменений фильтрационных свойств в пределах разрывного нарушения

Это исследование показало, что зона разлома на месторождении может быть использована как канал миграции геотермальных вод. При увеличении коэффициента фильтрации в разломной зоне увеличивается скорость потока и к зоне разгрузки происходит миграция более древних термальных вод. Полученные данные моделирования достаточно хорошо соотносятся с результатами определения периода водообмена по изотопам углерода и гелия.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту 20-05-00727.

Список литературы

1. *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.
2. *Hiscock K.* Hydrogeology principles and practice Malden, Oxford, Carlton: Blackwell Publishing, 2005. 389 p.
3. *Lyamina L.A.* Chemical and mineralogical composition of water-bearing materials of the Kuldur Geothermal Reservoir (Jewish Autonomous Region) / *L.A. Lyamina, N.A. Kharitonova, A.A. Karabtsov // Journal IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2020. Vol. 459, № 4. P. 1–7, DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042038.

TOUGH2-modeling of the water recharge conditions for the Paratunsky geothermal field

Nikita B. Zhuravlev

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
zhuravlev-95@mail.ru*

A profile mathematical model of the water supply process for the Nizhne-Paratunsky and Northern sections of the Paratunsky geothermal reservoir was assembled using the TOUGH2 software package and PetraSim graphic preprocessor.

Keywords: hydrogeology, Paratunsky geothermal field, Vilyuchinskiy volcano, water supply, TOUGH2

TOUGH2-моделирование условий водного питания Паратунского геотермального месторождения

Н.Б. Журавлев

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Осуществлено построение профильной математической модели процесса водного питания Нижне-Паратунского и Северного участков Паратунского геотермального резервуара с применением программного комплекса TOUGH2 и графического препроцессора PetraSim.

Ключевые слова: гидрогеология, Паратунское геотермальное месторождение, вулкан Вилучинский, водное питание, TOUGH2

Паратунское геотермальное месторождение находится в эксплуатации с 1964 года и используется для центрального отопления, бальнеологии и тепличного хозяйства. Месторождение функционирует в режиме самоизлива, текущая эксплуатационная нагрузка составляет 256 кг/с.

Исходя из результатов анализов изотопного состава воды, область водного питания Паратунских геотермальных месторождений приподнята до отметок ледников и многолетних снежников. Поэтому области с абсолютными отметками выше 1000 м, где фиксируется распространение ледников (Вилучинский вулкан, 2175 м абс.) и многолетних снежников (Вилучинский вулкан, локальные приводораздельные области кальдеры Леонова в верховьях р. Карымшина), являются наиболее вероятными областями водного питания Паратунских геотермальных месторождений (Kiryukhin et al., 2017).

Вилучинский вулкан является источником более легких вод, чем центральный сектор кальдеры Леонова (максимальные высотные отметки 1200 м абс.). Инфильтрационное питание из постройки Вилучинского вулкана выражается в облегчении изотопного состава воды Нижнего и Северного участка по сравнению с утяжеленными термальными водами Верхне-Паратунского геотермального месторождения и Среднего участка Паратунского геотермального месторождения, подпитываемыми инфильтрационными водами из центрального сектора кальдеры Леонова (Воронин, 2019).

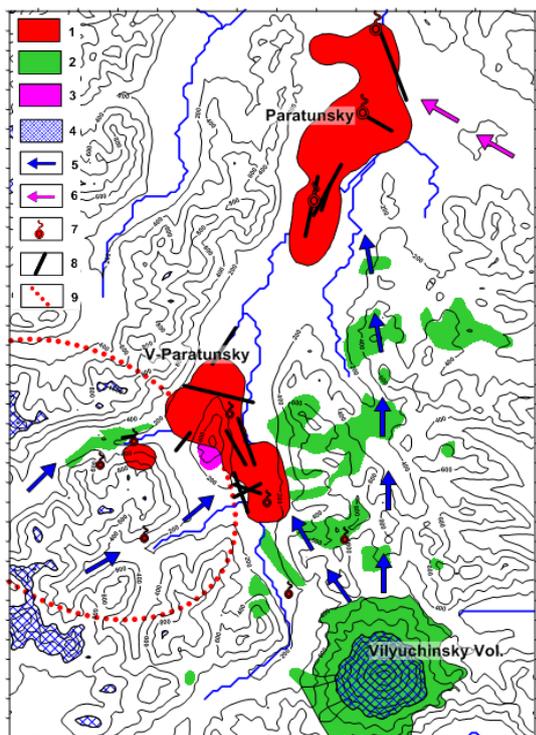


Рисунок 1 – Геофильтрационная и геотермическая структура, условия водного питания и граничные условия Паратунских геотермальных месторождений (Kiryukhin et al., 2017). Легенда:

- 1 – контуры продуктивных геотермальных резервуаров на отметке -750 м абс. по геоизотерме 75°C (Паратунское) и 60°C (Верхне-Паратунское);
- 2 – Голоценовые лавовые потоки и шлаковые конуса;
- 3 – Риолитовые экструзии 0,5-0,8 МУ;
- 4 – области водного питания Паратунских геотермальных резервуаров (с отметками более 1000 м абс.);
- 5- Проекция флюидных потоков от областей водного питания к продуктивным резервуарам;
- 6 – Притоки хлоридных вод в продуктивный резервуар, вызванные его эксплуатацией;
- 7 – Термальные источники;
- 8 – Следы продуктивных разломов на отметке -750 м абс.;
- 9 – Границы кальдеры Леонова

Хорошо выраженные в орогидрографии структуры северо-северо-западного, субмеридионального северо-восточного простирания могут вмещать каналы, по которым холодная вода тающих ледников и снежников вулкана проникает через жерло вулкана в разломы фундамента на глубины 4-5 км и, прогреваясь на протяжении 20-30 км за счет съема тепла вмещающих горных пород, кондуктивного теплового потока и локальных магматических питающих систем потухших вулканов, приходит уже в виде $80-100^{\circ}\text{C}$ воды в Паратунские продуктивные геотермальные резервуары. Площадь постройки Вилучинского вулкана с отметками выше $+900$ м абс. составляет 19 км^2 , из которых значительную часть занимают многолетние снежники и ледники, что при увеличивающейся с высотой интенсивности атмосферных осадков более 5000 мм может обеспечить сток воды с расходом более $3\text{ м}^3/\text{с}$. Если 15 % от этого стока преобразуется в подземный сток, то этого достаточно для обеспечения водного питания Нижнего, Северного и Микижинского участков Паратунского геотермального месторождения. Приподнятое положение постройки Вилучинского вулкана обеспечивает повышенное гидродинамическое давление ($+100 \dots +200$ бар), гидроразрыв, раскрытие и реактивацию сдвиговых трещин и разломов, повышение проницаемости по пути фильтрации (Кирюхин, Журавлев, 2019).

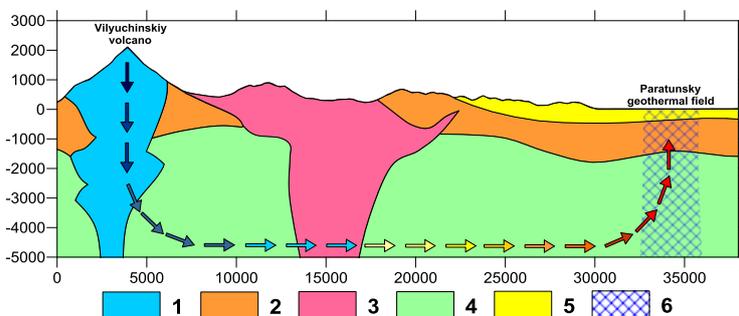


Рисунок 2 – Концептуальная модель водного питания участков Нижний. Северный Паратунского месторождения по данным (Шварц и др., 1995). 1 – постройка влк. Вилучинский; 2 – туфопесчаники и туфоконгломераты, туфогенно-пирокластические породы; 3 – интрузия среднего состава; 4 – вулканогенные, вулканогенно-осадочные отложения; 5 – аллювиальные гравийно-галечные отложения; 6 – зоны повышенной трещиноватости и проницаемости

Для описания тепломассопереноса в гидротермальных системах эффективным инструментом является программа моделирования потоков многофазных флюидов и потоков тепла в пористой и трещиноватой среде – TOUGH2. Для графической визуализации результатов математического моделирования совместно используется препроцессор PetraSim. При его помощи и исходя из концептуальной модели системы *Вилючинский вулкан – Паратунское геотермальное месторождение* (рис. 2) было осуществлено построение профильной математической модели процесса водного питания Паратунского геотермального резервуара.

Модель включает постройку Вилючинского вулкана и участки Нижний, Северный Паратунского месторождения по линии разреза от вершины вулкана до бассейна р. Левая Быстрая. Область моделирования по оси Z от 2100 м до –5000 м, по оси X от 0 до 38000 м, по оси Y от 0 до 100 м. На рис. 3 показано зонирование модели, где в каждой из зон задаются различные значения, проницаемости, пористости, плотности, теплопроводности. Значения петрофизических свойств доменов представлены в табл. 1. В верхней части домена PIPE задано поступление флюида (воды) 425 кг/с. Верхней границе модели присвоено фиксированное состояние, соответствующее атмосферным условиям ($T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1\text{ бар}$). В нижних ячейках модели заданы значения теплового потока от 0,06 до 0,2 мВт/м².

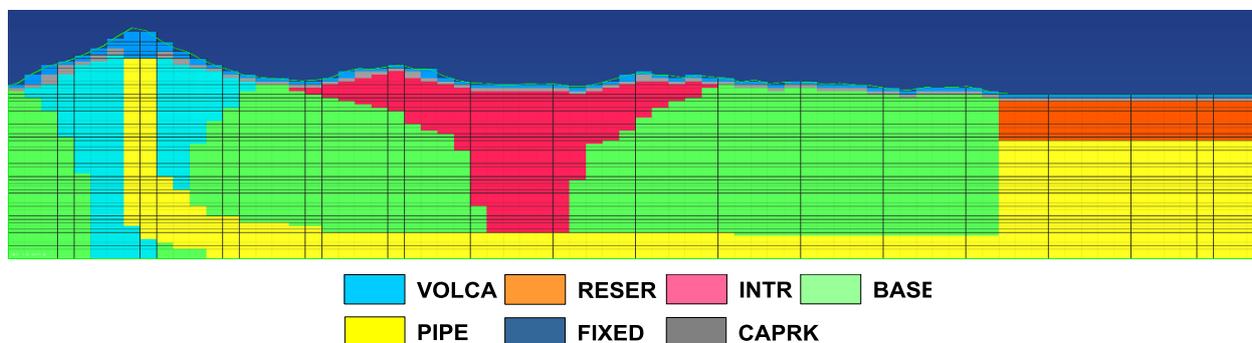


Рисунок 3 – Зонирование модели на домены с различными материальными свойствами зон. Условные обозначения: VOLCA – постройка влк. Вилючинский; PIPE – проницаемые структуры, по которым происходит водное питание; BASE – вмещающие породы фундамента, низкопроницаемые зоны;

INTR – интрузивные породы; RESER – проницаемый продуктивный резервуар Паратунского месторождения; FIXED – зона с фиксированным состоянием окружающей среды (температурой и давлением); CAPRK – водоупор

Таблица 1 – Материальные свойства доменов модели

| Характеристики | Домены | | | | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
| | VOLCA | PIPE | BASE | INTR | RESER | CAPRK |
| Плотность, кг/м ³ | 2700 | 2300 | 2700 | 2700 | 2300 | 2700 |
| Пористость | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 |
| Горизонтальная проницаемость, м ² | 10 ⁻¹⁶ | 10 ⁻¹³ | 10 ⁻¹⁶ | 10 ⁻¹⁶ | 10 ⁻¹² | 10 ⁻¹⁷ |
| Вертикальная проницаемость, м ² | 10 ⁻¹⁶ | 10 ⁻¹³ | 10 ⁻¹⁶ | 10 ⁻¹⁶ | 10 ⁻¹³ | 10 ⁻¹⁷ |
| Теплопроводность, Вт/м °С | 2,1 | 2,1 | 1,4 | 2,1 | 2,1 | 2,1 |
| Теплоемкость, Дж/кг °С | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Сжимаемость, Па ⁻¹ | 10 ⁻⁸ | 10 ⁻⁸ | 10 ⁻⁸ | 10 ⁻⁸ | 4,1×10 ⁻⁸ | 10 ⁻⁸ |

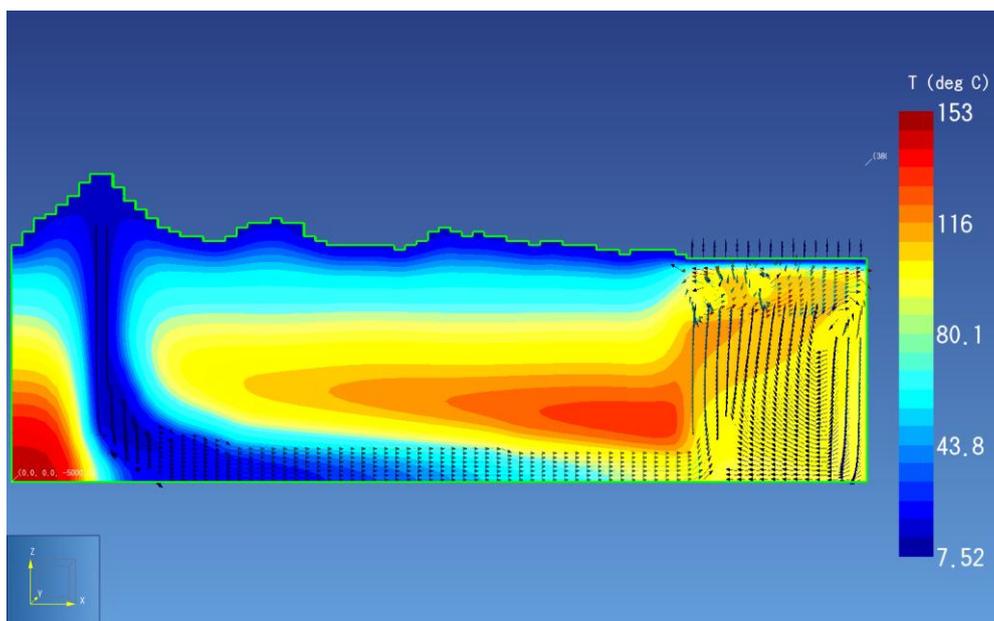


Рисунок 4 – TOUGH2 моделирование условий водного питания Паратунского геотермального месторождения. Векторами на разрезе показаны направления потоков теплоносителя. Цветом показано распределение температуры

Прогон модели выполнялся на период 30 тыс. лет. В результате моделирования получены следующие результаты:

1. Показано, что вода поступает через проницаемую зону, проходящую через вулкан Вилючинский на глубины $-3000... -5000$ м, где нагревается под действием тепловых источников и движется в сторону разгрузки, к Нижне-Паратунскому и Северному участкам.

2. Получен профильный разрез модели, на котором показано распределение температур. Максимальные значения температур приходятся на продуктивный геотермальный резервуар. Изолинии максимальных температур вытянуты в направлении движения потоков теплоносителя в геотермальном резервуаре. Векторами на разрезе показаны направления потоков теплоносителя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту 18-05-00052-20.

Список литературы

1. Kiryukhin A.V. Thermal and permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs in Kamchatka, Russia / A.V. Kiryukhin, L.A. Vorozheikina, P.O. Voronin, P.A. Kiryukhin. // Geothermics. 2017. P. 47–61.

2. Шварц Я.Б. Опытнo-методическая работа по применению геологоструктурных, гидрогеологических, геофизических и дистанционных критериев поиска термальных вод на закрытых площадях / Я.Б. Шварц, А. Г. Нурмухамедов, А. С. Желтухин. Термальный: Авачинская тематическая гидрогеологическая партия. 1995. Т. 2.

3. Кирюхин А.В. Возможности использования Паратунского геотермального месторождения для теплообеспечения Камчатки / А.В. Кирюхин, Н.Б. Журавлев // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 21–33.

4. Воронин П.О. Анализ результатов определений изотопного состава воды скважин Паратунского геотермального месторождения за период 2014–2018 гг. // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (GeothermalVolcanologyWorkshop 2019), 4 – 9 сентября 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 90–94.

Hydrothermal systems of Kamchatka as an analogue of the prebiological environment in the early Earth

Vladimir Kompanichenko

*Institute for Complex Analysis of Regional Problems FEB RAS, Birobidzhan, Russia
kompanv@yandex.ru*

The talk presents results of studying the hydrothermal systems of Kamchatka in the context of the origin-of-life problem, starting with the pioneering research in the 70s of the last century. The main attention is paid to the researches of the author together with colleagues (Poturay V.A., Shlyufman K.V., Karpov G.A., Deamer D., Simoneit B.), which were carried out in two directions. First, the composition of organic compounds in hot solutions and condensate of a steam-water mixture was studied within the Mutnovsky, Uzon, Pauzhetsky and Paratunsky hydrothermal systems. In total, we have identified more than 150 organic compounds belonging to 18 homologous series (including biologically important nitrogen-containing compounds and lipid components). Second, the regime of pressure and temperature fluctuations in wells of a number of hydrothermal systems was studied. Based on the mathematical processing of the data provided by the AV Kiryukhin's group, we have established at least three types of pressure fluctuations in the steam-water mixture in the Mutnovsky hydrothermal system: irregular macro-oscillations, regular micro-oscillations with periods of about 20 minutes, and sharp pressure surges and micro-oscillations with periods of less than 5 minutes. According to the author's «inversion» concept, it was the different-rank fluctuations of physicochemical parameters that stimulated the transformation of prebiological microsystems into primary life forms in the ascending flow of the hydrothermal fluid. In this regard, the following directions in the study of the hydrothermal process seem promising: study of fluctuations of parameters in hydrothermal channels (periods from fractions of a second to tens of minutes); connection of fluctuations with active tectonics; composition of organic molecules and microsystems in a fluctuating hydrothermal flow; the influence of phase transitions «water-steam».

Keywords: hydrothermal system, pressure oscillations, organic matter, origin of life

Гидротермальные системы Камчатки как аналог предбиологической среды на ранней Земле

В.Н. Компаниченко

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия

В докладе приводятся результаты изучения гидротермальных систем Камчатки в контексте проблемы зарождения биосферы, начиная с пионерских публикаций в 70-х годах прошлого века. Основное внимание уделено исследованиям автора совместно с коллегами (Потурай В.А., Шлюфман К.В., Карпов Г.А., Deamer D., Simoneit B.), которые проводились по двум направлениям. Во-первых, изучался состав органических соединений в горячих растворах и конденсате паро-водяной смеси в пределах Мутновской, Узонской, Паужетской и Паратунской гидротермальных систем. Всего нами установлено более 150 органических соединений, принадлежащих к 18 гомологическим рядам (включая биологически важные азот-содержащие соединения и липидные компоненты). Во-вторых, был изучен режим колебаний давления и температуры в скважинах ряда гидротермальных систем. На основе математической обработки данных, предоставленных группой А.В. Кирюхина, нами было установлено как минимум три типа колебаний давления пароводяной смеси в Мутновской гидротермальной системе: нерегулярные макроколебания, регулярные микроколебания с периодами порядка 20 минут, и резкие скачки давления и микроколебания с периодами менее 5 минут. Согласно авторской «инверсионной» концепции, именно разноранговые колебания физико-химических параметров стимулировали трансформацию предбиологических микросистем в первичные формы жизни в восходящем потоке гидротермального флюида. В этом контексте следующие направления изучения гидротермального процесса представляются перспективными: изучение колебаний параметров в гидротермальных каналах (с периодами от долей секунды до десятков минут); связь колебаний с активной тектоникой; состав органических молекул и микросистем во флуктуирующем гидротермальном потоке; влияние фазовых переходов «вода-пар».

Ключевые слова: гидротермальная система, колебания давления, органическое вещество, зарождение биосферы

Пионерские исследования по проблеме происхождения жизни на Камчатке в 70-е годы прошлого века

В 70-х годах 20 века на Камчатке был проведен ряд исследований, связанных с проблемой возникновения жизни, в которых принимали участие ученые института вулканологии ДВО РАН и института космических исследований РАН. Е.К. Мархинин с коллегами были обнаружены аминокислоты (строительный материал белков) в свежевывавшем вулканическом пепле, что интерпретировалось как абиогенный синтез этих соединений во время извержений (Markhinin, Podkletnov, 1977). Примерно в это же время Л.М. Мухин с соавторами опубликовал результаты определения аминокислот в нескольких гидротермальных системах Камчатки (Мухин и др., 1979). Значение этой работы заключалось в том, что впервые в стерильном конденсате пароводяной смеси была установлена простейшая аминокислота (глицин), генезис которой был предварительно определен как абиогенный. В результате упомянутых исследований было показано, что вулканогенно-гидротермальный процесс мог генерировать синтез биологически важных органических компонентов на ранней Земле, когда жизнь на ней еще отсутствовала. В 70-е годы подобных работ на природных объектах специалистами по происхождению жизни в мире еще не проводилось, основное внимание ими уделялось лабораторным экспериментам по предбиологической химии. Гидротермальный сценарий зарождения жизни начал разрабатываться только с 80-х годов после открытия простейших экосистем в районах выхода горячих источников на дне океанов. Континентальные гидротермальные системы начали серьезно изучаться в контексте возникновения жизни еще позже – с начала 21 столетия. Сейчас такие исследования уже широко проводятся как на Камчатке, так и в других регионах мира – в США (Калифорния), Мексике, Японии, Италии, Новой Зеландии.

Эксперимент по растворению биологически важных органических соединений в горячем источнике

В 2001–2004 годах на Камчатке проводила исследования совместная российско-американская астробиологическая экспедиция. В ее работе принимали участие известные специалисты в области астробиологии из США (David Deamer, Cristopher McMay, Sherry Cady, etc.), а также ряд российских ученых (Владимир Компаниченко, Геннадий Карпов, Евгений Вакин, Георгий Яроцкий) (Kompanichenko, 2019). В ходе экспедиции 2004 года был проведен первый в мире эксперимент по растворению биологически важных органических соединений в одном из горячих источников Дачного термального поля, подготовленный Дэвидом Димером (David Deamer); позже он был повторен в геотермальной зоне под названием Бампасс Ад возле горы Лассен, Калифорния (Deameretal, 2006). Размер источника составляет примерно 0,7 x 0,7 метра, ориентировочный объем – 7 литров. Температура раствора в центре кипения была 97 °С и рН 3,1. В источник была помещена смесь следующих компонентов: 4 аминокислоты (глицин, L-аланин, L-аспарагиновая кислота, L-валин, 1 грамм каждая), четыре нуклеиновых основания (аденин, цитозин, гуанин и урацил, 1 грамм каждый), фосфат натрия (3 грамма), глицерин (2 грамма) и миристиновая кислота (1,5 грамма). Смысл эксперимента заключался в изучении поведения различных соединений в естественных гидротермальных условиях. Пробы воды (50 мл) отбирали до добавления порошка, затем через 1, 5, 30, 60, 120 минут, 24 часа и 9 дней. В ходе этого мониторинга было выявлено, что большая часть добавленной органики и фосфата была удалена из раствора с полупериодом, измеряемым от нескольких минут до нескольких часов. Таким образом, два пурина – гуанин и аденин – исчезли из раствора примерно через 2 часа. Анализ глины показал, что эти органические соединения были адсорбированы на минеральных поверхностях при кислом рН бассейна. Однако, в ходе последующих модельных лабораторных экспериментов, проведенных Дэвидом Димером, было обнаружено, что органические вещества могут высвобождаться в основном растворе (с добавлением NaOH).

Органические соединения средней летучести в гидротермальных системах

С 2005 года автором (совместно с В.А. Потураем и В.Л. Рапопортом) проводится изучение органических соединений средней летучести в горячих растворах и конденсате паро-водяной смеси в пределах Мутновской, Узонской, Паужетской, Паратунской и некоторых других гидротермальных систем. Цель этого исследования состоит в том, чтобы определить спектр органических компонентов, которые реально присутствуют в гидротермальных системах и которые могли участвовать в процессе формирования простейших форм жизни на ранней Земле. Отобранные пробы были объединены в две группы: а) вода из горячих источников и бассейнов с температурой 55-98 °С, где обитают термофильные и гипертермофильные микроорганизмы; б) стерильный конденсат пароводяной смеси из глубоких скважин (600–2000 м) с температурой от 108 °С до 175 °С. Органическое вещество экстрагировалось из воды и затем анализировалось на хромато-масс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010S. В ходе этого исследования было установлено, что стерильный конденсат пароводяной смеси содержит 69 органических соединений, относящихся к 11 гомологичным рядам. Органическое вещество из обитаемых горячих источников более разнообразно. Оно состоит из 111 соединений (14 гомологичных рядов). Всего нами установлено более 150 органических соединений, принадлежащих к 18 гомологическим рядам. Среди них выявлены важные биогенные соединения, которые могли играть большую роль в возникновении жизни – азот-содержащие соединения (нитрилы, амиды, и др.) и липидные компоненты (эфир, альдегиды, карбоновые кислоты и др.) (Компаниченко и др., 2016; Kompanichenko, 2017).

Колебания давления и температуры в гидротермальных системах

Другое направление исследований автора (совместно с К.В. Шлюфманом) связано с изучением характера колебаний давления (а также температуры) в гидротермальных системах. В отличие от других подходов к объяснению возникновения жизни, разрабатываемая автором «инверсионная» концепция рассматривает высокочастотные (вплоть до долей секунды) колебания физико-химических параметров в материнской среде как необходимое условие возникновения жизни (Kompanichenko, 2017). Предполагается, что колебания стимулируют рекомбинацию органических молекул и инициируют непрерывный ответ предбиологических микросистем на непрекращающиеся внешние воздействия (стресс). В этой связи нами были математически обработаны несколько баз данных по динамике давления и температуры в скважинах Мутновской и Паужетской гидротермальных систем. Мониторинг проводился в устьях и глубоких зонах скважин. Наиболее детальные исследования были проведены на основе данных по динамике давления паро-водяной смеси за 2004 год, любезно предоставленных группой А.В. Кирюхина (2002). Глубина фиксирования давления в скважине 30 составляла 950 метров, интервал между замерами 2 минуты, всего сделано около 250 000 определений. Нами эти данные были исследованы математическими методами прямого спектрального анализа для получения амплитудно-частотной характеристики давления. В ходе исследования выявлена крупномасштабная и мелкомасштабная изменчивость давления. Первая соответствует низкочастотной составляющей динамики и проявляется в виде макрофлуктуаций со значительными (до 2 бар) резкими или плавными изменениями давления. Мелкомасштабная изменчивость представлена как нерегулярными, так и регулярными колебаниями. В ее рамках можно выделить среднечастотную и высокочастотную составляющие. Среднечастотная составляющая соответствует плавным флуктуациям с периодами около 20 минут (частота 0,00083 Гц), максимальное изменение давления между замерами составляет 0,7 бар. Высокочастотная составляющая представлена резкими изменениями значений давления (снижение, повышение и выбросы), а также флуктуаций с периодами менее 5 минут (Компаниченко, Шлюфман, 2013). По другим базам данных, коэффициент корреляции между давлением и температурой в Мутновском геотермальном месторождении составляет в среднем 0,96. Результаты проведенного исследования могут быть использованы для дальнейшего развития гидротермального сценария зарождения первичных форм жизни,

включая проведение лабораторных экспериментов по предбиологической химии в колебательных условиях, моделирующих природную среду.

Перспективные направления исследований

В ходе изучения вулканогенно-гидротермального процесса в разных регионах мира ученые получают огромное количество данных. Но многие из них и не подозревают, насколько большое значение результаты их исследований могут иметь для понимания возникновения первичных форм жизни на ранней Земле. В первую очередь, это касается материалов изучения геохимических и геофизических параметров восходящего гидротермального потока в верхней части земной коры. В частности, по представлениям автора, именно в нем происходило вызревание первичных форм жизни на фоне постепенного (хотя и пульсационного) снижения температуры и давления при движении раствора к поверхности (Kompanichenko, 2017). Известно, что основной тенденцией поведения растворенного вещества является его агрегация и комплексообразование при снижении температуры в ходе развития гидротермального процесса. В этот процесс естественно встраивается и постепенное усложнение органических макромолекул и предбиологических микросистем, которое при наличии оптимального режима колебаний физико-химических параметров и привело к трансформации последних в наипростейшие микроорганизмы. В этом плане наиболее перспективными представляются следующие направления исследований: изучение колебаний параметров в гидротермальных каналах, особенно высокочастотные (периоды от долей секунды до десятков минут); зависимость колебаний параметров от внешних факторов (активная тектоника, извержения, землетрясения); преобразование флюида при фазовых переходах вода-пар и обратно при резких изменениях давления; состав органических молекул и микросистем во флуктуирующем гидротермальном потоке, характер их ответного реагирования на внешние воздействия.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью / А.В. Кирюхин, М.Д. Лесных, А.Ю. Поляков // *Вулканология и сейсмология*. 2002. № 1. С. 51–60.
2. *Компаниченко В.Н.* Амплитудно-частотная характеристика колебаний давления пароводяной смеси в Верхне-Мутновской гидротермальной системе. / В.Н. Компаниченко, К.В. Шлюфман // *Вулканология и сейсмология*. 2013. № 5. С. 51–58.
3. *Компаниченко В.Н.* Органические соединения в термальных водах Мутновского района и кальдеры Узон / В.Н. Компаниченко, В.А. Потурай, Г.А. Карпов // *Вулканология и сейсмология*. 2016. № 5. С. 35–50.
4. *Мухин Л.М.* Аминокислоты в гидротермах Южной Камчатки / Л.М. Мухин, В.Б. Бондарев, Е.А. Вакин и др. // *Доклады АН СССР*, 1979. Том 244, № 4. С. 974–977.
5. *Kompanichenko V.* Thermodynamic Inversion: Origin of Living Systems. Springer International Publishing, Cham (Switzerland). 2017.
6. *Markhinin E.K.* The phenomenon of formation of prebiological compounds in volcanic processes / E.K. Markhinin, N.E. Podkletnov // *Origins of Life*. 1977. № 3. P. 225–235.

Complex observations on the Verkhne-Paratunskaya hydrothermal system (Kamchatka)

Yuri D. Kuzmin

*Kamchatka branch of the Geophysical Survey of the RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
kuzy@emsd.ru*

The problem of the interaction of geochemical and geophysical fields and the elucidation of the role of the influence of geophysical fields on the change in the geochemical parameters of the active geological medium in the form of a response has been of interest to researchers for a long time. As a rule, the most contrasting change in the geochemical parameters of the environment occurs in thermogradient fluid-saturated environments in fault zones confined to seismically active regions, under the influence of variations in geophysical fields of various nature. These environments include hydrothermal systems.

Keywords: hydrothermal system, geophysical, geochemical, response, impact

Комплексные наблюдения на Верхне-Паратунской гидротермальной системе (Камчатка)

Ю.Д. Кузьмин

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук»

Проблема взаимодействия геохимических и геофизических полей и выяснение роли воздействия геофизических полей на изменении геохимических параметров активной геологической среды в виде отклика, интересует исследователей давно. Как правило, наиболее контрастно изменение геохимических параметров среды происходит в термоградиентных флюидонасыщенных средах в разломных зонах, приуроченных к сейсмоактивным регионам, под действием вариаций геофизических полей разнообразной природы. К таким средам можно отнести и гидротермальные системы.

Ключевые слова: гидротермальная система, геофизические, геохимические, отклик, воздействия

Введение

В настоящее время, Земля, единственная из планет Солнечной системы, обладает уникальным веществом – водой. Происхождение которой предложено в виде метеоритно-кометной гипотезы (гипотеза 1) (Виноградов, 1988) и гипотезы происхождения воды, основанной на экспериментальных работах Н.Н.Семенова по синтезу воды из водорода и кислорода и изотопных исследованиях воды в различных водосодержащих средах (гипотеза 2) (Кузьмин, 2020). Каждая из этих гипотез специфична в объяснении механизма формирования водной оболочки Земли, который определяется процессами переноса воды из глубин Земли к поверхности за счет дегазаций (гипотеза 1) или поверхностном происхождении воды и переносе метеорных вод с поверхности планеты в ее глубины с последующими взаимодействиями вода/порода (гипотеза 2). Водная оболочка Земли представлена наземной и подземной гидросферами. Основная масса воды сосредоточена в наземной гидросфере, но основную тектоническую нагрузку, которая является реакцией среды на закачку энергии извне, несет подземная гидросфера, в которой происходят разнообразные геофизические и геохимические процессы, связанные с преобразованием вещества и деформациями в различных термодинамических условиях. Эти процессы контролируются сейсмичностью в широком диапазоне частот. Все геохимические и геофизические процессы взаимосвязаны и происходят в основном в водонасыщенной среде. Вода и тепло определяют всю геологическую и биологическую жизнедеятельность нашей

планеты, эволюция которой определяется: воздействиями солнечного излучения (изменения поверхностной температуры планеты); корпускулярными потоками солнечного вещества (изменения геомагнитного поля) и солнечно-лунными приливными явлениями. Эти воздействия вызывают ответную реакцию планеты, в виде отклика, стремящегося приводить планетарную систему в равновесное состояние. Природа этих откликов проявляется в полях геохимического и геофизического генезиса. Как правило, наиболее контрастно изменения геохимических параметров среды, под действием вариаций геофизических полей разнообразной природы, происходят в термоградиентных флюидонасыщенных средах в разломных зонах, приуроченных к сейсмоактивным регионам. К таким средам можно отнести как магматические очаги, так и гидротермальные системы, которые могут быть представлены самоизолирующимися и саморегулирующимися системами, в которых фиксируется повышенная температура и давление, относительно вмещающих пород.

Постановка проблемы и пункт наблюдения

Для решения данного вопроса необходимо правильно определиться с методами наблюдений, выбором наблюдательной скважины, техническими возможностями организации наблюдений, сбором, накоплением, хранением и обработкой полученных данных. Для Камчатки наиболее значимыми наблюдениями являются наблюдения, связанные с реакцией среды на сейсмические воздействия, т.к. они представляют наибольшую опасность для населения и промышленных производств. Наиболее интересными для данных наблюдений представляются водонапорные (самоизливающиеся) скважины с термальными водами, циркуляция которых, в ряде случаев соизмерима с расположением очагов коровых землетрясений, а пункты наблюдений располагаются в местах, где имеется достаточное количество разнопараметрических скважин.

На первом этапе данной работы ставилась задача получения рядов наблюдений за газо-термодинамическими параметрами гидротермальной системы (ГТС), которая рассматривалась нами в качестве природного объемного деформометра. На использование ГТС в качестве природного объемного деформографа, нас навели работы японских исследователей, которые для получения данных о движениях земной коры использовали скважинные деформографы. В ГТС внешние воздействия: гравитационные, геомагнитные, сейсмические, метеорологические и другие будут регистрироваться в виде геохимических, газо-термодинамических и др. флуктуаций внутренних параметров среды, которая находится под действием локальных, региональных и планетарных деформаций. По нашим представлениям, любая термоградиентная система (магматический очаг или гидротермальная система) является чувствительным объемным деформографом, в котором даже незначительные изменения объема приведут к изменениям термодинамических и геохимических параметров системы. Контролируя эти параметры, мы можем судить о реакции гидротермальной системы на внешние воздействия. Таким образом, ГТС, как самоорганизующаяся система, будет стремиться к равновесию, и мы будем наблюдать флуктуации процессов саморегуляции при постоянно изменяющихся силовых воздействиях внешнего происхождения. Если бы не было внешних воздействий, то система через какое-то время вошла бы в устойчивое равновесное состояние и стала пассивной.

Пункт наблюдений, за реакцией термодинамических, геохимических параметров ГТС на внешние геофизические воздействия приливного и не приливного характера, расположен в районе низкотемпературной Верхне-Паратунская гидротермальной системы (ВП ГТС) в южной части Камчатки. В геолого-структурном плане ВП ГТС относится к вулcano-купольной структуре, которая расположена в зоне пересечения двух сложно построенных депрессионных структур, получивших названия Паратунского и Карымшинского грабенов, образованных блоковыми подвижками в четвертичное время. Район находится в восьмибальной зоне сейсмического районирования. Площадь месторождения составляет примерно 30 км². В центре месторождения возвышается липаритовый экстрезивный купол сопки Горячей. Разрывная тектоника представлена многообразными разломами, что создает сложную блоковую структуру, которая, определяет

и контролирует термальную деятельность ВП ГТС. На ВП ГТС, в связи с поиском термальной воды для отопления теплиц, было пробурено 45 скважин разной глубины. Все 45 скважин в пределах месторождения вскрыли термальные воды различные по температуре и химсоставу. Из них 2 скважины К-88 и ГК-37 попали в зону восходящего теплового потока. (Смирнова, 1980)

Наблюдения на комплексном пункте «Карымшина» Геофизической службы РАН начались в 2000 г. К ним относились: сейсмические, магнитные, электротеллурические, газохимические и термодинамические измерения, проводимые разными лабораториями. Газохимические и термодинамические наблюдения проводились и проводятся лабораторией гидросейсмологии. Флуктуации температуры и давления в скважине ГК-37 (глубина – 1750 м, Т на выходе = 96 °С, Р = 10 атм, скважина обсажена на глубину 600 м) регистрируются с частотой измерения 10 минут на автономную измерительную систему. Пример регистрации данных температуры и давления на устье скважины приведены на рис. 1.

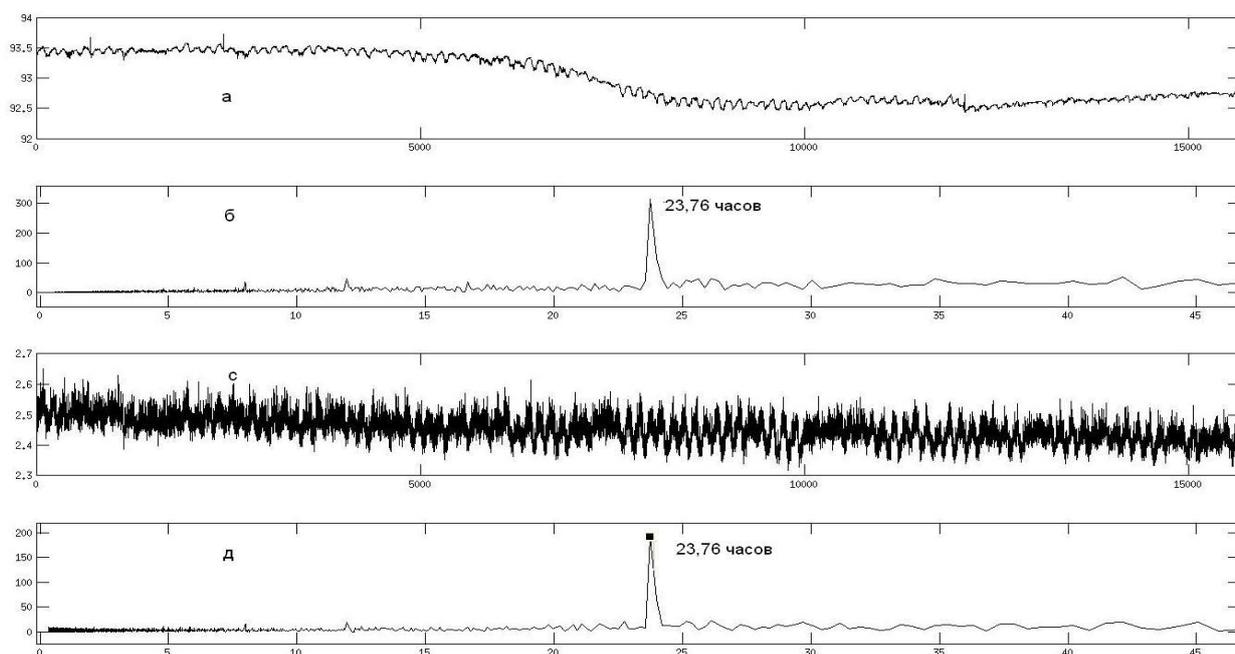


Рисунок 1 – Спектрально-временной график околосуточных термодинамических флуктуаций в скв ГК-37

а – график температуры околосуточных флуктуаций, б – временной спектр температуры околосуточных флуктуаций; в – график давления околосуточных флуктуаций, д – временной спектр давления околосуточных флуктуаций

Регистрация радона-торона производится с помощью– сейсмо-радоновых станций СРС-1. с собственной климатической камерой, регистрирующей атмосферное давление, температуру и влажность прокачиваемого воздуха в пункта наблюдения. Подпочвенный радон/торон измеряется в сухой 4 м скважине, почвенный – в будке, практически с поверхности земли. Частота измерений составляет 30 мин. Данные радона-торона запоминаются в собственную память радиометров, которые с помощью программы снимаются на компьютер. Далее данные обрабатываются, строятся графики и анализируются. Для расширения видов наблюдений на ВП ГТС привлекались данные и проводились совместные работы с ИВиС и ИКИР Дальневосточного отделения РАН (Руленко и др, 2015, Руленко и др, 2019). При этом хочется обратить внимание на график спектро-временного анализа (рис. 1в, д) суточных флуктуаций температуры и давления в глубокой скважине ГК-37, который показывает, что в спектре околосуточных колебаний присутствует только солнечная составляющая и нет приливной лунной, что подтверждает, ранее установленные зависимости: корреляции тектонической деятельности Земли с изменениями магнитного поля Земли (Куражковский и др, 2007); корреляции расхода лавы

Толбачинского извержения 1976 г. с солнечной активностью (Леонов, 1979); корреляции геомагнитной активности с микроземлетрясениями (Кузьмин и др, 1990, Surenda, 1978) и др.

Выводы

Проведенные работы позволяют сделать вывод, что данная гидротермальная система – как объемный природный деформограф, является надежным источником информации о реакциях геологической среды на внешние геофизические воздействия приливного и неприливного характера.

Список литературы

1. *Виноградов А.П.* Избранные труды. Проблемы геохимии и космохимии. М.:Наука, 1988. 336 с.
2. *Кузьмин Ю.Д.* Происхождение воды и ее роль в эволюции Земли / Ю.Д. Кузьмин, В.Г. Сахно // Вестник ДВО РАН, 2020. № 2. С. 115–129.
3. *Кузьмин Ю.Д.* О влиянии космических факторов на сейсмичность и вулканизм Камчатки / Ю.Д. Кузьмин, В.А. Широков // Вопросы географии Камчатки. 1990. Вып. 10. С. 90–98.
4. *Леонов В.Л.* О возможности сопоставления вулканической и солнечной активности на примере БТТИ // Вулканология и сейсмология. 1979. № 6. С. 62–66.
5. *Руленко О.П.* Увеличение радона и торона в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. / О.П. Руленко, Ю.Д. Кузьмин // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 36–42.
6. *Руленко О.П.* Совместное возмущение геоакустической эмиссии, радона, торона и атмосферного электрического поля по данным наблюдений на Камчатке / О.П. Руленко, Ю.В. Марапулец, Ю.Д. Кузьмин, А.А. Солодчук // Физика Земли. 2019. № 5. С. 76–86.
7. *Смирнова Н.Ф. и др.* Сводный отчет о результатах поисково-разведочных работ на Верхне-Паратунском месторождении термальных вод, проведенных в 1966 – 1980 гг. с подсчетом эксплуатационных запасов по состоянию на 17 мая 1980 г. ТГФ Камчатгеолкома. 1980.
8. *Singh Surenda* Geomagnetic activity and microearthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer, 1978. Vol. 68. P. 1533–1535.

CHAPTER III. SEISMICITY IN GEOFLUID VOLCANIC AND HYDROTHERMAL SYSTEMS WITH ACTIVE FAULTS

РАЗДЕЛ III. СЕЙСМИЧНОСТЬ В ГЕОФЛЮИДНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С АКТИВНЫМИ РАЗЛОМАМИ

УДК 550.34.01+551.24

Application of the Fluid-Geomechanical Model for the Source of the 11-3-2011 Tohoku Catastrophic Earthquake

Alexey V. Solomatin

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
alf55@mail.ru*

Presents the results of a study on the construction of a model of plane-oriented clusters of aftershocks of the strongest ($M = 9,1$) catastrophic earthquake over the past decade, which occurred on March 11, 2011 on the northwestern flank of the Pacific. Its source stretched for several hundred kilometers along the eastern coast of Honshu Island, Tohoku Prefecture, Japan. This earthquake is one of three giant ($M = 8,8-9,3$) earthquakes that have occurred in the digital age. The uniqueness of this event for research, primarily in the vast seismically active region of the northwestern Pacific Ocean, is associated both with the scale of seismotectonic processes that accompanied the Tohoku earthquake and with the detail and diversity of the results of their study.

The proposed model for the preparation and implementation of the Tohoku earthquake is based on identifying clusters of earthquake hypocenters in its source, which are, among other things, flat ruptures. The paper considers the relationship of such clusters, identified on the basis of activations and foreshocks preceding the main event, as well as its aftershocks, with the main direction of the morphological structures of the region under consideration. Geofluidodynamic concepts are considered as an important part of the analysis of this relationship.

Keywords: seismic process, earthquake source, hydraulic fracturing, fluid dynamics, geomechanical model of seismicity

Приложение геофлюидомеханической модели к очагу катастрофического землетрясения Тохоку 11.III 2011 г.

А.В. Соломатин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Представлены результаты исследования по построению модели плоскоориентированных кластеров афтершоков сильнейшего ($M = 9,1$) катастрофического землетрясения за последнее десятилетие, произошедшего 11 марта 2011 г. на северо-западном фланге зоны сейсмического очага Тихого океана. Его очаг протянулся на несколько сотен километров вдоль восточного побережья о-ва Хонсю, префектура Тохоку, Япония. Это землетрясение является одним из трех гигантских ($M = 8,8-9,3$) землетрясений, которые произошли в эпоху цифровых наблюдений. Уникальность этого события для исследований, прежде всего, обширного сейсмически активного района северо-западной части Тихого океана связана как с масштабом сеймотектонических процессов, сопровождавших землетрясение Тохоку, так и с детальностью и многоплановостью результатов их изучения.

Предлагаемая модель подготовки и реализации землетрясения Тохоку основана на выявлении кластеров гипоцентров землетрясений в его очаге, представляющих, в том числе, плоские разрывы. В работе рассмотрена связь таких кластеров, выделенных на основе предваряющих основное событие активизаций и форшоков, а также его афтершоков, с основным направлением морфологических структур рассматриваемого региона. В качестве важной части анализа этой связи рассматриваются геофлюидодинамические представления.

Ключевые слова: сейсмический процесс, очаг землетрясения, гидроразрыв, флюидодинамика, геомеханическая модель сейсмичности

Очаг землетрясения Тохоку 11.III 2011 г., $M = 9,1$, и некоторые особенности сопровождавшей его форшоковой и афтершоковой активности

Землетрясение Тохоку 11.III 2011 г. произошло на стыке Тихоокеанской и Евразийской плит. В то же время, тектоника в этом регионе осложняется влиянием еще двух плит: примыкающей Филиппинской и относительно удаленной Охотской (Рис. 1).

Анализ особенностей развития сейсмического процесса в очаге землетрясения Тохоку показал, что форшоковое повышение сейсмической активности в его очаге с $M_{\max} = 7,3$ началось 9 марта 2011 г. в полном соответствии со «сценарием форшоков» (Fedotov et al., 2012). В то же при расширении указанного сценария на более ранний период было отмечено, что все наиболее сильные последние землетрясения Курило-Камчатского региона, а также землетрясение Тохоку 11.III 2011 г. предварялись значимой активизацией в период $T = 1043 \pm 10$ суток до главного события. В очаге землетрясения Тохоку такая активизация с главным событием $M = 6,9$ и двумя предшествующими событиями с $M = 6,2$ и $6,1$ наблюдалась 7.V 2008 г. и продолжилась до 8-9.V 2008 г. (Рис. 1). Подобные активизации, связанные с периодичностью развития сейсмического процесса (Solomatin, 2014) были позднее отмечены и в других сейсмоактивных областях Тихого океана.

Согласно данным (Rebetsky, Polets, 2014) распространение подвижек в очаге землетрясения Тохоку происходило в течение нескольких десятков секунд, достигнув радиуса в 70 км за 30 секунд. После этого момента скорость распространения подвижек вдоль протяжения глубоководного желоба стала меньше аналогичной скорости в направлении, определяемом субдукцией. Распространение афтершоков после главного события существенно иное. Прежде всего, наибольшая кластеризация афтершоков приходится на значительно больший период – три первых часа после главного события. В этот период область афтершоков в плане описывается треугольником, направления сторон которого хорошо согласуются с основными направлениями структур, выделяемых на батиметрической карте (Рис. 1). Линия глубоководного желоба в районе о-ва Хонсю образует заметный изгиб в плане, охватывающий его западную вершину. Кроме того, здесь же наблюдаются характерная сетка складок рельефа.

Вычисление следов плоскоориентированных кластеров гипоцентров афтершоков на глубине 40 км за первые трое суток было проведено с помощью программы FRAC-Digger (Kiruykhin et al, 2016) с параметрами: $N \geq 6$, $\delta t \leq \infty$, $\delta Z \leq 10$ км, $\delta R \leq 100$ км. Критерии выбора соответствуют опции постояннодействующих сейсмогенных региональных разломов. Полученная структура имеет сложный характер, тем не менее, в предположении существования ее узла вблизи глубоководного желоба она удовлетворительно согласуется с основными направлениями структур рельефа (Рис. 1).

Направление развития сейсмического процесса после наибольшего события при обеих активизациях 2008 и 2011 гг. по восстанию сейсмогенной зоны (Рис. 1) также вполне объяснимо с позиций участия флюидного механизма в их развитии.

Рассмотрение структуры очага землетрясения Тохоку с учетом геофлюидодинамической модели сейсмического процесса

Из указанного выше рассмотрения с геофлюидодинамической позиций образования сейсмотектонических разрывов, проявляющихся в виде плоскоориентированных кластеров землетрясений, можно сделать следующие выводы:

1) Существуют достаточно мощные, секущие слои литосферы линейные разломные структуры. Такие разломы при соответствующих условиях могут быть проводниками глубинных флюидов.

2) Направление основных разломов определяет поле более мелких субразломов, трассируемых плоскоориентированными кластерами землетрясений. Такие субразломы генерируются в условиях разрывного воздействия глубинных флюидов: аналогичным процессом являются гидроразрывы. Поступление флюидов на верхние уровни становится возможным после вызванного главным событием перераспределения напряжений.

3) Между районами основного события и наиболее сильного его афтершока, а также между близкими к ним областями активизаций 7-9.V 2008 г. и 9-10.III 2011 г. выделяется узел структуры разрывных плоскостей, связанный, как предполагается, с каналом поступления флюидов глубинного происхождения.

Участие флюидного механизма в образовании сейсмотектонических разрывов естественным образом объясняет существенную задержку распространения сейсмического процесса после распространения главного разрыва.

Строгое следование сейсмическим процессом определенным периодичностям (Fedotov et al, 2011; Solomatin, 2014; и др.) усиливает гипотезу о важной роли флюидов в сейсмическом процессе, особенно в критических точках его развития.

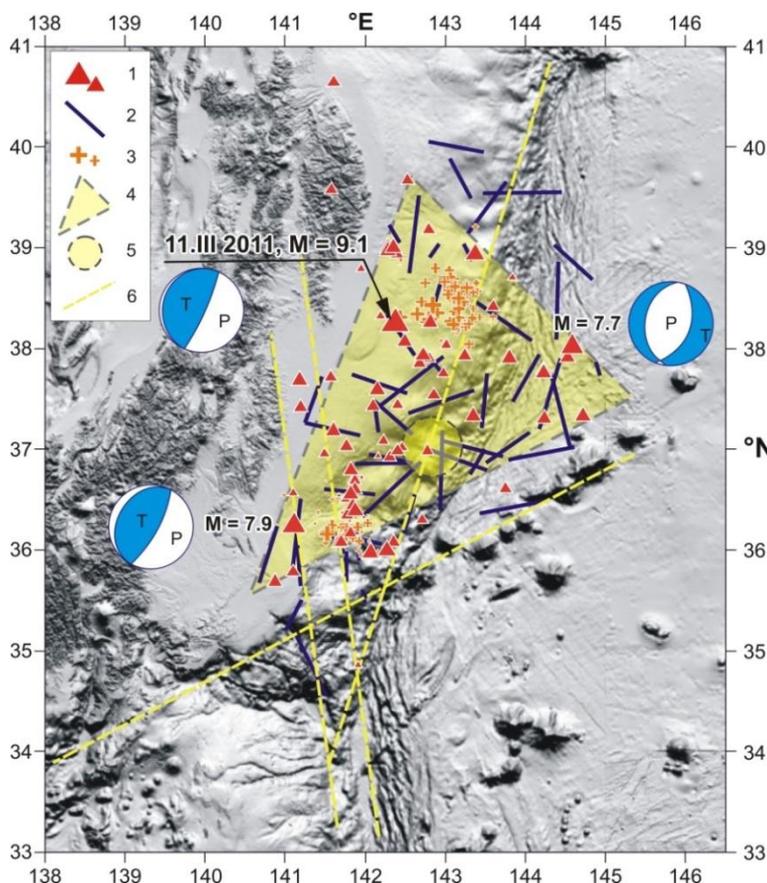


Рисунок 1 – Схема структурных элементов очага землетрясения Тохоку 11.III 2011 г., $M = 9,1$.

1 – эпицентры главного события и афтершоков первых часов после него; 2 – следы на глубине 40 км выделенных плоских кластеров афтершоков первых трех суток (Kiryukhin et al, 2016); 3 – форшоки 9-10.III 2011 г. (верхний кластер) и активизация 7-9.V 2008 г. (нижний кластер); 4 – предполагаемая область развития разрывообразования в первые часы после главного события; 5 – предполагаемый узел развития системы плоскостей разрывов; 6 – линейные элементы, выделенные на основе структур рельефа и конфигурации поля афтершоков первых часов после главного события. Представлены также механизмы главного события и его наибольших афтершоков (данные US GS)

Вместе с тем, естественно рассматривать роль флюидного механизма в сейсмическом процессе в комплексе с традиционно геомеханическими представлениями, которые в достаточной мере развиты, теоретически и эмпирически обоснованы. Кроме того, решение многих, уже решенных проблем, на основе только флюидных механизмов не представляется возможным. Таким образом, успешное изучение строения сейсмоактивных сред, а также законов и тенденций их развития возможны только на основании комплексного подхода, включающего как широкий ряд имеющихся сейсмотектонических представлений, так и относительно новые в этих областях представления гидродинамики-геофлюидодинамики.

Работа выполнена при поддержке по Проекту РФФИ 18-05-00052-19.

Список литературы

1. Kiryukhin A.V. A Geomechanical Interpretation of the Local Seismicity Related to Eruptions and Renewed Activity on Tolbachik, Koryaksky, and Avacha Volcanoes, Kamchatka, in 2008–2012 / A.V. Kiryukhin, S.A. Fedotov, P.A. Kiryukhin // Journal of Volcanology and Seismology. 2016. Vol. 10, № 5. P. 275–291.

2. *Rebetsky Yu.L.* The state of stresses of the lithosphere in Japan before the catastrophic Tohoku earthquake of 11 March 2011 / *Yu.L. Rebetsky, A. Yu. Polets* // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. № 5(2). P. 469–506, DOI: 10.5800/GT-2014-5-2-0137.

3. *Solomatin A.V.* A study of the relationship between volcanic activity and great earthquakes: the Kuril-Kamchatka region // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2014. Vol. 8 № 1. P. 54–68.

4. *Fedotov S.A.* A long-term earthquake forecast for the Kuril-Kamchatka Arc for the period from September 2010 to August 2015 and the reliability of previous forecasts, as well as their applications / *S.A. Fedotov, A.V. Solomatin, S.D. Chernyshev* // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2011. Vol. 5 № 2. P. 75–99.

5. *Fedotov S.A.* A long-term earthquake forecast for the Kuril-Kamchatka Arc for the period from September 2011 to August 2016. The likely location, time, and evolution of the next great earthquake with $M \geq 7.7$ in Kamchatka / *S.A. Fedotov, A.V. Solomatin, S.D. Chernyshev* // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2012. Vol. 6, № 2. P. 65–88.

УДК 551.49:550.21

TOUGH2-EWASG modeling of water level changes in well E-1 (Elizovsky district, Kamchatka peninsula)

Pavel O. Voronin¹, Galina N. Kopylova²

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
malgor90@mail.ru*

²*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (KB GS RAS)
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
gala@emsd.ru*

The modeling of the change in the water level in the well E-1, taking into account the flow of gas from the host aquifer at a depth of 625-647 m has been done. Necessary gas consumption should be 36-67 g/s with an average consumption of 12-24 g/s. Modeling has shown a possible contribution of the gas lift effect to water level changes. However, taking into account the high gas flow rates obtained, it can be assumed that water exchange between the waters of the water-bearing complex and in the wellbore also plays a significant role in the water level fluctuations.

Keywords: well, water level, gas lift, Kamchatka peninsula

TOUGH2-EWASG моделирование изменения уровня воды в скважине E-1 (Елизовский район, полуостров Камчатка)

П.О. Воронин¹, Г.Н. Копылова²

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

²*Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Петропавловск-Камчатский, Россия*

Выполнено моделирование изменения уровня воды в скважине E-1 с учетом притока газа из вмещающего водоносного комплекса на глубине 625-647 м. По результатам моделирования установлено, что для объяснения наблюдаемых колебаний уровня воды в 2011–2020 гг. расход газа должен составлять 36-67 г/с при среднем расходе 12-24 г/с. Моделирование показало возможный вклад в изменения уровня воды эффекта газлифта. Однако, принимая во внимание полученные высокие расходы газа, можно полагать, что существенную роль в колебаниях уровня воды также имеет водообмен между водами водовмещающего комплекса и в стволе скважины.

Ключевые слова: скважина, уровень воды, газлифт, полуостров Камчатка

Введение

Скважина Е1 пробурена в 1984 г. и после проведения геофизических и гидрогеохимических испытаний используется для режимных наблюдений в целях поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений. Она расположена на расстоянии 17 км от вершины вулкана Корякский и в 9 км от его подножия, в области предполагаемого флюидо-магматического резервуара [1-8].

По данным бурения в интервале 0-570 м были вскрыты четвертичные гравийно-галечниковые отложения, в интервале 570-665 м – туфы алнейской серии неогена (N_{al}). В зоне слабого водопритока на глубине 625-647 м, была проведена перфорация обсадной колонны, при этом на глубине 665 м был сделан искусственный забой. Обсадка ствола скважины выполнена металлической колонной диаметром 219 мм. Уровень воды в скважине установился на глубине около 28 м.

Подземные воды в интервале 625-647 м относятся к водам гидродинамической зоны затруднённого 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 растворённого 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. %, He – 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 находящемся в равновесии с атмосферным воздухом. Это свидетельствует о том, что в районе скважины в алнейских вулканитах происходит генерация или транспортировка газа азотно-углеводородного состава.

Часть углерода в газе вероятно имеет магматическое происхождение, так-как изотопный состав углерода в пробах CH_4 и CO_2 отобранных из других скважин и термальных источников относящихся к Авачинско-Корякскому вулканогенному бассейну указывают на это [3, 5, 6, 7, 8]. Однако прямого подтверждения этого для скважины Е-1 нет, так как изотопный анализ проб газа для неё не проводился.

В изменениях уровня воды в скв. Е-1 не проявляются приливные вариации, а также годовые сезонные вариации. Для ее режима характерны долговременные тренды понижения и повышения уровня воды продолжительностью до 5-6 лет, на фоне которых выделяются понижения уровня воды в течение до десятков суток, предшествующие сильным субдукционным землетрясениям с магнитудами $M \geq 5$, и постсейсмические повышения. Понижения уровня воды с повышенной скоростью в течение недели – первых месяцев регистрировались примерно перед 70 % таких землетрясений на гипоцентральных расстояниях $d_e \leq 350$ км от скважины. Такие особенности гидродинамического режима связаны с тем, что скважина контролирует подземные воды гидродинамической зоны затрудненного водообмена, а также с тем, что в составе подземной воды в водовмещающих породах и в стволе скважины содержится газ азотно-метанового состава.

Долговременные изменения уровня воды могут происходить как вследствие изменения условий питания или разгрузки водоносного горизонта, так и вследствие изменения прово-трещинной емкости водовмещающих пород. Роль первой причины в формировании многолетнего тренда представляется несущественной из-за удалённости областей питания и разгрузки, а также из-за крайне низких скоростей фильтрации подземных вод в пределах неогеной толщи. В то же время в условиях упругого режима фильтрации незначительно варьирование емкости пород может отражаться на изменении давления подземной воды и проявляться в изменениях уровня.

Во время прохождения сейсмических волн от сильных землетрясений происходит динамическая деформации водовмещающих пород, вызывающая изменение физического состояния газонасыщенного флюида, заполняющего трещинно-поровое пространство

водоносного пласта, в первую очередь, переход газовой фазы из растворенного состояния в свободное. В результате выделения свободного газа из подземного флюида (эффект газлифта) может происходить увеличение разгрузки подземной воды в ствол скважины, а также более медленное и плавное повышение температуры воды, увеличение концентрации отдельных компонентов минерального состава воды и увеличение концентрации растворенных газов. Изменение температуры, химического состава жидкой и газовой фаз подземных вод после землетрясений происходит вследствие интенсивного поступления в ствол скважины воды из водоносного горизонта.

Для оценки возможного вклада эффекта газлифта в наблюдаемые изменения уровня скважины Е-1 было выполнено моделирование.

Моделирование изменений уровня воды с учетом притока газа

В рамках созданной модели (рис. 1) ствол скважины (от устья до забоя на глубине 665 м) представлен вертикальной колонной, состоящей из высокопроницаемых элементов. Примыкающие к ней элементы в нижней части модели представляют водовмещающие породы с величиной пористости 0,06, которая задана по аналогии с величиной пористости туфогенно-осадочных неогеновых отложений, вскрытых скв. 1303 в диапазоне глубин 517-717 м [2]. Водопроницаемость была задана как 0,004 м²/сут, в соответствии с результатам обработки восстановления уровня воды после экспресс-наливаов в 1991 и 2012 гг. Уровень воды в скважине без притока газа был задан на глубине 28 м. Приток газа задавался в области перфорации ствола скважины, при этом не учитывался возможный приток воды из водовмещающих пород при повышении давления во водоносном комплексе. Моделирование проводилось для изотермических условий.

Для моделирования была использована программа TOUGH2 с модулем состояния EWASG. Были созданы две модели. В первой модели в качестве поступающего газа был задан метан, для второй модели – азот. Для калибровки модели использовались данные измерений уровня воды за период 15.09.2011 – 01.03.2020 гг. с предварительной компенсацией баровариаций [4].

Результаты моделирования представлены на рис. 2. На верхних графиках показаны минимальные значения расхода газа, обеспечивающие наблюдаемые колебания уровня воды. Зеленая линия обозначает расход поступающего газа по результатам моделирования с использованием метана в качестве поступающего газа, синяя линия – соответственно, азота. Красной линией отображен предполагаемый расход смешанного газа при соотношении азота и метана в 60/40.

Результаты моделирования показывают, что для получения наблюдаемых колебаний уровня воды за счёт только притока газа достаточным является его расход до 36 г/с при поступлении метана и 67 г/с при поступлении азота. Для смеси этих газов необходимый расход составляет около 54 г/с. При моделировании средние значения расхода составили 12 г/с для метана, 24 г/с для азота и около 19 г/с для их смеси.

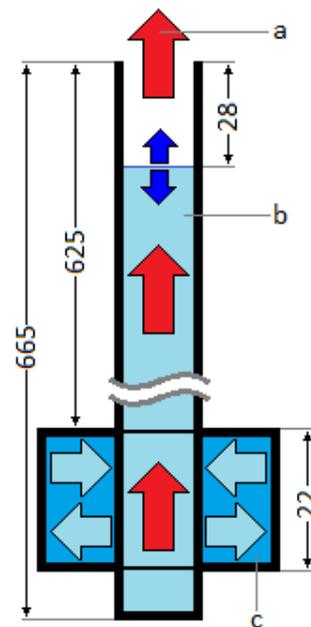


Рисунок 1 – Схема модели. а – поток газа, b – водяной столб в стволе скважины, c – водовмещающие породы примыкающие к зоне перфорации

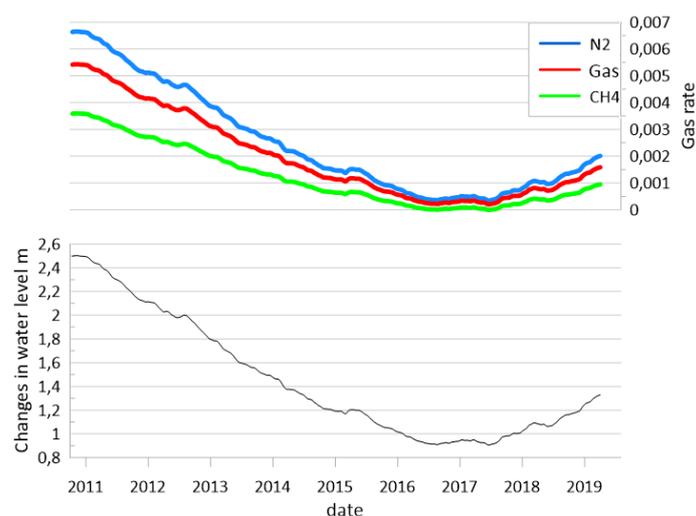


Рисунок 2 – График измеренных колебаний уровня воды в скважине Е-1 в 2011–2020 гг, и модельные графики расхода газов, обеспечивающие наблюдаемые колебания за счет эффекта газлифта

Результаты

1. По результатам выполненного моделирования показана возможность наблюдаемых на скважине Е-1 долговременных изменений уровня воды за счёт вариаций притока газа. Вместе с тем, полученные высокие значения необходимого расхода газа, с учетом низкой проницаемости пород в зоне перфорации скважины, представляются маловероятными. Это требует привлечения дополнительного механизма притока воды из водовмещающего комплекса в ствол скважины при росте давления подземной воды.

2. Для получения более точных оценок роли газовой разгрузки в ствол скважины в изменениях уровня воды необходимо, кроме наблюдений за уровнем воды, осуществить замеры расхода газа и его химический анализ. Это позволит лучше откалибровать модель и получить более точные результаты.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18-05-00052-20 и РФФИ № 18-05-00337.

Список литературы

1. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987–1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 2. С. 39–52.

2. 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 ($M \geq 5$) землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 41–54.

3. Кирюхин А. В., Манухин Ю. Ф., Федотов С. А., Лаврушин В. Ю., Рычкова Т. В., Рябинин Г. В., Поляков А. Ю., Воронин П. О. Геофлюиды Авачинско–Корякского вулканогенного бассейна, Камчатка. // Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология. № 4. 2015. С. 306–320.

4. 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. Т. 52, № 4. С. 43-56, DOI: 10.21455/si2016.4-4.

5. Кирюхин А. В., Федотов С. А., Кирюхин П. А. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3–20.

6. Кирюхин А. В., Федотов С. А., Кирюхин П. А., Черных Е. В. Магматические питающие системы Корякско–Авачинской группы вулканов по данным локальной

сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3–17.

7. Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P., and Voronin P. Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia). *Hindawi Geofluids*. 2017. Article ID 4279652, P. 21, DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/4279652>.

8. Bushenkova, N., Koulakov, I., Senyukov, S., Gordeev, E. I., Huang, H.-H., El Khrepy, S., & Al Arifi, N. (2019). Tomographic images of magma chambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. № 124. P. 9694–9713, DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JB017952>.

9. Курюхин 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.

10. Курюхин 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.

УДК 550. 344.43

Estimations of the energy attenuations of the seismic waves at near distances from Kizimen volcano

Mikhail V. Lemzikov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
lemzikov@kscnet.ru*

The swarm of volcanic earthquakes during the eruption of the Kizimen volcano made it possible to study the seismic absorption of the energy of seismic waves in volcanic rocks at short hypocentric distances from the volcano. The study was performed using code waves and using a frequency-dependent method: a model of a single backscattering of code waves. Perhaps further research in this direction will also allow us to investigate the stress-strain state of volcanic rocks under the volcano and in its cone. The determination of the energy absorption of transverse seismic waves showed that the Q factors obtained from the data of a station located closer to the volcano are significantly lower than the Q factors obtained from the data of a station located far away.

Keywords: volcanic earthquakes, wave forms, seismic station, frequency, attenuation

Оценка поглощения энергии сейсмических волн на близких расстояниях от вулкана Кизимен

М.В. Лемзиков

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Произошедший рой вулканических землетрясений во время последнего извержения вулкана Кизимен, позволил изучить сейсмическое поглощение энергии поперечных сейсмических волн в вулканогенных горных породах на коротких гипоцентральных расстояниях от этого вулкана. Изучение выполнено по волновым формам вулканотектонических землетрясений и с использованием зависимого от частоты метода: модель однократного обратного рассеивания кода-волн. Возможно, дальнейшее исследование в этом направлении позволит исследовать также напряженно-деформированное состояние вулканогенных горных пород вблизи под вулканом и в его конусе. Определение поглощения энергии поперечных сейсмических волн показало, что оценки добротности, полученные по данным станции, расположенной ближе к вулкану значительно ниже, оценок добротностей, полученных по данным станций, установленных на далеком расстоянии от вулкана.

Ключевые слова: вулканические землетрясения, волновые формы, сейсмическая станция, частота, поглощение

В работе преследуется цель проследить, как меняются оценки добротности вулканогенных горных пород по данным станций, установленных на ближнем и на далеком расстоянии от вулкана Кизимен. Карта района вулкана Кизимен и эпицентры вулканотектонических землетрясений, используемых в работе представлена на (Рис. 1). Из архива Камчатского Филиала Федерального Исследовательского Центра «Единая Геофизическая Служба (КФ ФИЦ ЕГС) РАН» выбирались цифровые записи волновых форм вулканотектонических землетрясений, произошедших во время последнего извержении вулкана Кизимен. На выбранных для анализа цифровых записях присутствуют четкие вступления продольных и поперечных сейсмических волн. Преобладают объемные волны, поверхностные волны отсутствуют. Такие события относятся к первому типу вулканических землетрясений и называются вулканотектоническими по классификации (Токарев, 1981).

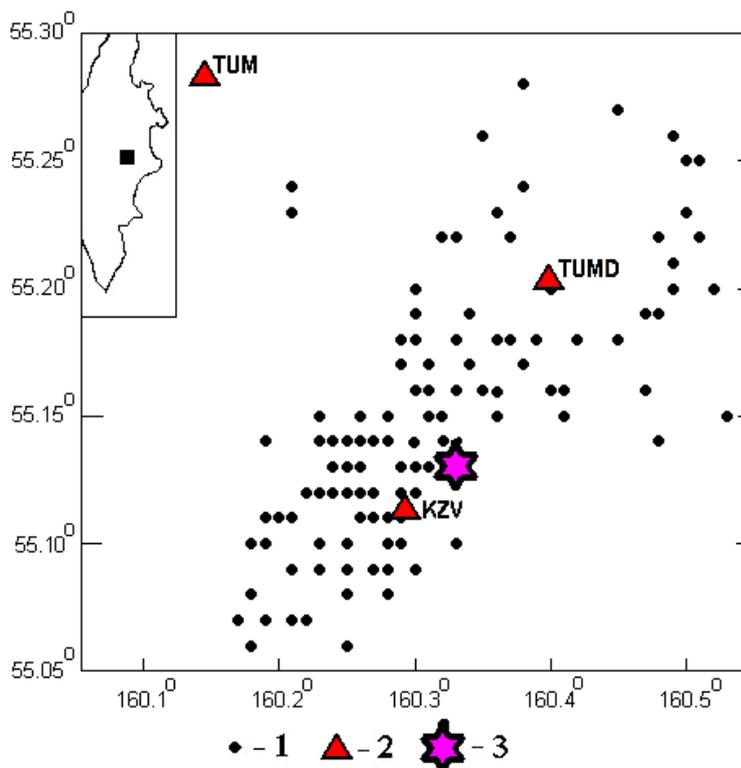


Рисунок 1 – Карта района исследования: 1 – эпицентры слабых вулканотектонических землетрясений вулкана Кизимен 2011–2013 гг.; 2 – сейсмические станции (1 – TUM, 2 – TUMD, 3 – KZV); 3 – вершина вулкана Кизимен. На врезке: черным квадратом показано расположение исследуемого района на карте Камчатки

Для уменьшения влияния поверхностных эффектов на формирование кода-волн выбирались более глубокие вулканотектонические землетрясения – с очагами под вулканом в диапазоне глубин 5-12 км. При извержении вулкана Кизимен вулканотектонических землетрясений с очагами глубже 12 км не было.

Для получения большей однородности оценок добротности вулканогенных горных пород цифровые записи волновых форм вулканотектонических землетрясений выбирались в узком диапазоне энергетических классов. Иногда такие землетрясения происходили на фоне вулканического дрожания, а также множества слабых вулканотектонических землетрясений, у которых «полезный» сигнал едва заметен на фоне помех. В этом случае выбирались события с соотношением по амплитуде сигнал/шум не менее двух.

Регистрация вулканотектонических землетрясений вулкана Кизимен выполнена радиотелеметрическими сейсмическими станциями КФ ФИЦ ЕГС РАН, установленными на склоне и вблизи этого вулкана: Кизимен (KZV), Тумрок (TUM) и Тумрок-источники (TUMD) (рис. 1). Пример слабого вулканотектонического землетрясения вулкана Кизимен представлен на рис. 2.

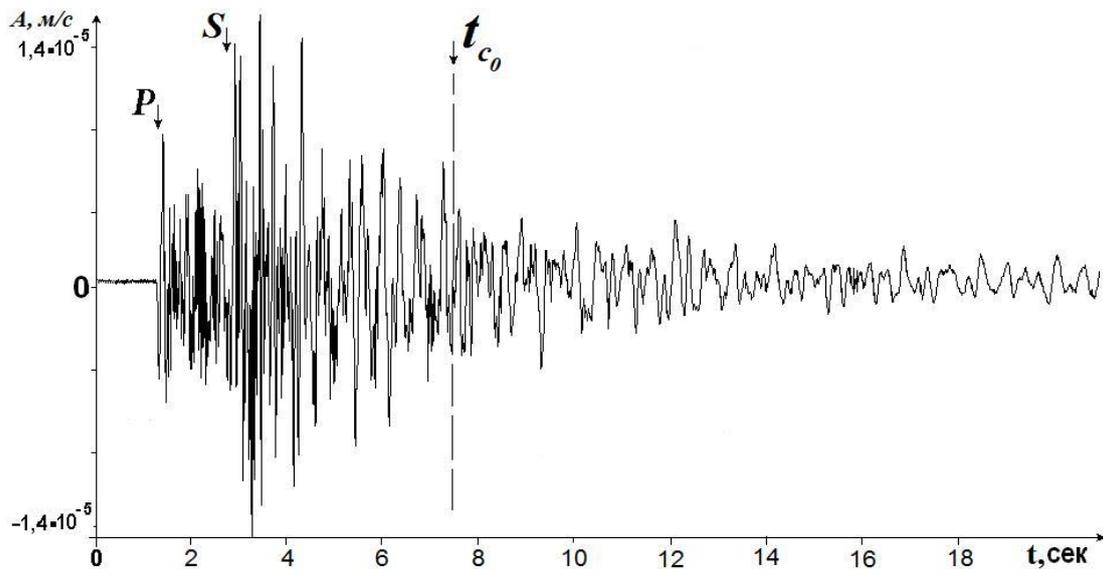


Рисунок 2 – Пример волновых форм слабого вулканотектонического землетрясения вулкана Кизимен, зарегистрированного 10 января 2010 г. по времени (UTC) 12 ч 00 мин 48,3 сек. Показаны начала вступлений P-, S- и момент времени t_{c0} – начало кода-волн

Сейсмическая станция (TUM) была установлена в 2003 г. и работает с целью слежения за слабой сейсмичностью района Восточной Камчатки. Сейсмическая станция (KZV) была установлена у подножия вулкана Кизимен в сентябре 2009 г., когда существенно возросла сейсмическая активность этого вулкана по сравнению с фоновой сейсмичностью. Сейсмическая станция (TUMD) была установлена в марте 2011 г., когда извержение вулкана Кизимен продолжалось. (Сенюков, 2010).

Станции KZV и TUM оснащены трехкомпонентным короткопериодным каналом для регистрации скорости смещений грунта: один вертикальный (SHZ) и два горизонтальных (SHE, SHN), и дополнительно – еще одна вертикальная компонента для регистрации скорости смещений грунта с повышенным уровнем чувствительности (EHZ). Станция TUMD оснащена трехкомпонентным комплектом широкополосных каналов для регистрации скорости смещений грунта: один вертикальный (BHZ) и два горизонтальных (BHE, BHN). Сейсмометрические каналы станции TUMD характеризуются не только широкой частотной полосой пропускания сейсмических сигналов, но и более высоким динамическим диапазоном по сравнению со станциями KZV и TUM.

Метод обработки и результаты

В предположении об однократном обратном рассеивании сейсмических волн в процессе формирования кода-волн и при условии помещения очага и станции в одну и ту же точку, огибающая кода-волн, как функция времени в фиксированный отрезок времени t_c , отсчитывается от времени в очаге названное промежутком времени (lapse time), может быть выражено, следуя (Aki, Chouet, 1975):

$$A(f, t) = A_0(f) \cdot t^{-n} \cdot \exp(-\pi ft / Q_c), \quad (1)$$

где $A_0(f)$ – функция, которая зависит от источника, пути и частоты f волны и свойств среды, t^{-n} – геометрическое расхождение, Q_c – показатель добротности кода-волны.

Параметр Q_c вычисляется на основе линейного соотношения, полученного логарифмированием обеих частей уравнения 1:

$$\ln(A(f, t) \cdot t^n) = \ln(A_0(f)) - \pi ft / Q_c. \quad (2)$$

Затем методом наименьших квадратов определяется угол наклона линии регрессии полученных данных, коэффициент $-\pi ft / Q_c$ и свободный член $-\ln(A_0(f))$. Форма кода-волн, при использовании этого метода, должна спадать однородно, без вступлений других волн. При обработке исходных данных это проверялось визуально и программно методом корреляции.

Результаты вычисления добротности Q_c представлены в табл. 1.

Из таблицы 1 видно, как проявляется отличие оценок добротности Q_c между станциями, с одной стороны KZV, а с другой – TUM и TUMD.

Таблица 1. Оценки добротности Q_c по данным трех станций, и средняя оценка Q_c

| Частота, Гц | Станция код | Кол-во наблюдений | Коэффициент корреляции | Оценки добротности, Q_c и средняя оценка Q_c | Область наблюдения, $Z_{набл.}$ |
|-------------|-------------|-------------------|------------------------|--|---------------------------------|
| 0,75 | KZV | 54 | 0,68 | 78,0 ± 27,0 | 4,0 |
| | TUM | 54 | 0,67 | 97,0 ± 32,0 | |
| | TUMD | 15 | 0,54 | 100,0 ± 28,0 | 2,7 |
| | сумма | 123 | | 93 ± 17 | |
| 1,5 | KZV | 54 | 0,68 | 106,0 ± 30,0 | 4,4 |
| | TUM | 72 | 0,68 | 130,0 ± 45,0 | |
| | TUMD | 16 | 0,54 | 131,0 ± 30,0 | 2,9 |
| | сумма | 142 | | 126 ± 22 | |
| 3,0 | KZV | 85 | 0,90 | 140,0 ± 47,0 | 6,4 |
| | TUM | 120 | 0,87 | 178,0 ± 63,0 | |
| | TUMD | 87 | 0,74 | 178,0 ± 37,0 | 5,5 |
| | сумма | 292 | | 169 ± 24 | |
| 6,0 | KZV | 87 | 0,95 | 184,0 ± 55,0 | 6,4 |
| | TUM | 115 | 0,93 | 230,0 ± 87,0 | |
| | TUMD | 77 | 0,90 | 224,0 ± 35,0 | 5,4 |
| | сумма | 297 | | 222 ± 17 | |
| 12,0 | KZV | 84 | 0,96 | 230,0 ± 87,0 | 6,8 |
| | TUM | 113 | 0,93 | 320,0 ± 96,0 | |
| | TUMD | 88 | 0,95 | 316,0 ± 91,0 | 6,3 |
| | сумма | 285 | | 298 ± 21 | |

Вывод

Оценки добротности вулканогенных горных пород по данным станции KZV, расположенной у подножия вулкана, характеризует добротность вулканогенных горных пород непосредственно вблизи и в конусе вулкана Кизимен, в то время как остальные две станции TUM и TUMD характеризуют добротность вулканогенных горных пород в глубоком слое от вулкана Кизимен.

Список литературы

1. *Сенюков С.Л.* Сейсмичность вулкана Кизимен / С.Л. Сенюков, И.Н. Нуждина, С.Я. Дроздина и др. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: тр. Третьей науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2010. С. 144–148.
2. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки М.: Наука, 1981. 164 с.
3. *Aki K.* Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects / K. Aki, B.A. Chouet. // J. Geophys. Res. 1975. Vol. 80. P. 3322–3342.

Seismicity factor influence mechanism on the regime of nitrogen alkaline thermal waters of crack-core systems in the Northern Tien Shan

Aida R. Kurmangaliyeva

*Astrakhan State University, Astrakhan, Russia
kraid@yandex.ru*

The mechanism of influence of processes of preparation of earthquakes of different depth and force is considered on the example of studying the regime of nitrogen alkaline thermals of crack-core systems of Alma-Ata seismic active region. The North Tianshan seismic belt is a part of the very active inland Mediterranean-Transasian belt; the granite layer of the Earth's crust reaches its maximum power here. Observations of the regime of the forecast network of the Alma-Ata seismic active region have been conducted for over 40 years on three dozen indicators. The mechanism of geodynamic movements in a viscous medium of medium and acidic intrusions, accompanied by earthquakes, is different from that in the subduction zone of the Pacific belt. The analysis of modern models of seismic process centers formation makes it possible to optimize the range of prognostic parameters of gas-chemical composition of ground waters in the regime network.

Keywords: uplift, fault, acrotherms, seismogenic, paragenesis, factor analysis

Механизм влияния фактора сейсмичности на режим азотных щелочных терм трещинно-жильных систем Северного Тянь-Шаня

А.Р. Курмангалиева

Астраханский государственный университет, Астрахань, Россия

На примере изучения режима азотных щелочных терм трещинно-жильных систем Алма-Атинского сейсмоактивного района рассматривается механизм влияния процессов подготовки землетрясений различной глубины и силы. Северо-Тяньшанский сейсмический пояс представляет часть весьма активного внутриматерикового Средиземноморско-Трансазиатского пояса; гранитный слой земной коры здесь достигает максимальной мощности. Наблюдения за режимом прогностической сети Алма-Атинского сейсмоактивного района ведутся более 40 лет по трем десяткам показателей. Механизм геодинамических движений в вязкой среде интрузивных образований среднего и кислого состава, сопровождающийся землетрясениями, отличается от такового в зоне субдукции Тихоокеанского пояса. Анализ современных моделей формирования очагов сейсмического процесса дает возможность оптимизировать диапазон прогностических показателей газохимического состава подземных вод режимной сети.

Ключевые слова: взброс, сброс, акротермы, сейсмогенный, парагенезис, факторный анализ

Тянь-Шанская горная система состоит из горных хребтов субширотного простирания, образовалась в позднепалеозойскую эпоху в результате сжатия между Индийской и Евразийской плитами. Последняя активизация датируется олигоценовым периодом (Абдрахматов, 2003). С неоген-четвертичным этапом развития Тянь-Шаньской складчатой области связывают утолщение до 50–60 км земной коры под горными хребтами (при относительном сокращении до 40–45 км под крупными впадинами), и формирование значительных гравитационных и тепловых аномалий. Крупные и катастрофические землетрясения редки и сосредоточены вдоль северной и южной границ горной системы. В настоящее время отмечается интенсивное меридиональное укорочение Тянь-Шаня (Зубович и др., 2007).

Особенность сейсмического режима Северного Тянь-Шаня обусловлена геологическим строением, интенсивностью протекающих геодинамических процессов и связана с древними глубинными разломами – Северо-Тяньшанским, Кеминским и Кунгейским. Зона активных разломов субширотного простирания тянется более чем на 600 км вдоль окраины орогена. Эпицентры большинства землетрясений Северного Тянь-Шаня лежат в узкой полосе вдоль северного склона Киргизского хребта, далее протягивающейся на восток до восточного погружения Кунгейского хребта и расположенного к северу Заилийского хребта (Абдрахматов, 2003). Землетрясения Северного Тянь-Шаня относятся к «коровым», с размещением очагов в верхней части земной коры, в домезозойском ее основании (Костюк и др., 2010).

С помощью глобальной спутниковой системы позиционирования (GPS), одним из эффективных средств изучения современных движений земной коры и геодинамики, установлено преобладание взбросов и сдвигов в механизмах очагов землетрясений. Основное направление осей сжатия меридиональное, с небольшим преобладанием северо-северо – западной ориентации. Растяжение происходит в северо-восточном направлении. Для Северного Тянь-Шаня преобладает механизм, при котором ось сжатия субгоризонтальна, а ось растяжения субвертикальна, что характеризует очаги взбросового типа движений (Крестников и др., 1987).

В коре Северного Тянь-Шаня преобладающими являются три разновидности механизмов сейсмических деформаций. В первом из них ось сжатия (P) субгоризонтальна и ориентирована в северо-восточном направлении, а ось растяжения (T) субвертикальна. Этот тип очагов характеризуется взбросовыми движениями. Второму типу отвечает субгоризонтальная ось растяжения (T), ориентированная в северо-восточном направлении, при этом ось сжатия (P) круто наклонена на юго-восток, что свидетельствует о сбросо-сдвиговом характере движений. Для третьего типа механизмов характерна субгоризонтальная ориентированность обеих осей, но ось сжатия имеет северо-западное направление, а растяжения – в северо-восточное, что указывает на сдвиговый характер движений (Ребецкий и др., 2016).

Наличие трех областей растяжения общей площадью менее 12 % от всей территории исследования связывается с неоднородностью раздавливания вещества при субмеридиональном сжатии и более сильным его выжиманием в некоторых зонах в широтном направлении. Неоднородностью деформационного поля подчеркивается неравномерный характер движения земной коры.

Гидрогеологические наблюдения за режимом подземных вод (азотных терм) проводятся на 12 станциях Алма-Атинской комплексной партии. Набор наблюдаемых параметров на станции доходит до тридцати и зависит от типа подземных вод, их химического состава, условий наблюдения и технической оснащенности станций.

Азотные термы Алма-Атинской сейсмоактивной зоны подразделяются на три группы:

1) трещинно-жильные теплые, маломинерализованные акротермы, циркулирующие в массивах палеозойских интрузий и эффузивов (в основном кислого состава), распространенные в горноскладчатых областях Заилийского Алатау;

2) трещинно-пластовые, различной температуры, сильно солоноватые термы эффузивов палеозойского фундамента и осадочных верхнемеловых отложений, слагающих нижний и средний структурно-гидрогеологические этажи Илийского артезианского бассейна;

3) пластово-поровые горячие воды повышенной минерализации среднего структурно-гидрогеологического этажа, имеющие выдержанное, а чаще спорадическое распространение в палеоген-миоценовой толще.

Азотные акротермы трещинно-жильного типа гидрогеологических массивов горноскладчатых сооружений отличаются исключительным разнообразием гидрогеохимических типов: от I до IIIa (по О. А. Алёкину), в основном мало минерализованные (от 0,16 до 1,6 г/дм³), теплые (от 20 до 37 °С), щелочные (рН от 8 до 9,9),

кремнистые (содержание H_4SiO_4 до 95 мг/л), обогащены радоном (11 – 40 эман), содержат редкие щелочи и галофильные элементы в микрокомпонентном составе.

Для выявления основных режимобразующих факторов азотных терм и конкретизации показателей, связанных с сейсмическим процессом, автором был использован метод главных компонент (МГК). Компонентам придается смысл факторов, чем подчеркивается причинный характер новых гипотетических переменных (Чесалов, Хаустов, 1986).

Компонентный анализ проведен по режимным данным 4-х воцопроявляемых азотных терм различных групп: «Нижняя Каменка», «Алма-Арасан», «Горельник» и «Курам». Временной ряд, включающий 7-8 лет, разбивался на 2-3 интервала в зависимости от количества измеряемых параметров.

Методом главных компонент были установлены факторы, относимые непосредственно к сейсмогенным. Общим отмечается парагенезис хлора, фтора, калия, содержание которых в обратной зависимости меняется от термодинамических показателей системы – дебита и температуры воды, концентрации сульфатов и катионов натрия и кальция. На сейсмические события реагируют и газы: гелий в растворенной и спонтанной форме, кислород, углекислый газ. Обязательно присутствуют в ассоциациях ортокремниевая кислота и радон (Курмангалиева, 1993).

Наибольшее количество аномалий, связанных с глубокофокусными землетрясениями, распределено в Чилико-Кеминском, Байсорунском и Торайгыр-Кетменском направлениях. При мелкофокусных землетрясениях аномальные изменения наблюдаются также в Джетыжолском, Кастекском и Иссык-Кульском направлениях. Чем меньше эпицентрального расстояние, тем больший набор главных компонент и дополнительных признаков фиксирует аномальные изменения.

Время проявления аномалий, помимо расстояния до эпицентра готовящегося землетрясения, зависит от механизма последнего – сжатия или растяжения. С учетом эпицентрального расстояния и класса землетрясения в водосодержащих системах азотных акротерм трещинно-жильного типа время проявления аномальных изменений при землетрясениях выше 13-го класса с эпицентрального расстояния свыше 100 км составляет 3-4 декады; при классе ниже 12-го – от 1 до 2 декад.

Проанализируем зависимость характера аномальных изменений значений главных компонент от механизма сейсмического события. Согласно исследованиям методом катакластического анализа разрывных смещений в коре Северного Тянь-Шаня по локальной сети KNET за 1994–2012 годы установлено, что основными типами механизма очагов в Алма-Атинском сейсмоактивном районе являются взбросы в сочетании со взбросо-сдвигами, а также сбросы со сбросо-сдвигами (Ребецкий и др., 2016).

Как известно, процесс сжатия горных пород, распространяясь на водонапорные системы, приводит к повышению давления в них, температуры, увеличению газонасыщенности, изменению состава растворенных газов и концентрации анионов. Механизм растяжения, происходящий по около вертикальной плоскости, при активном распространении трещиноватости характеризуется резким падением давления в водонасыщенной системе в связи с образованием новых резервуаров, при этом должны меняться рН-Еh условия, макрокомпонентный и газовый состав подземных вод.

Как известно, в гетерогенных системах механическое поле способно вызывать изменения: число фаз, количественную долю и состав. Примером служит конденсация паров в гравитационном поле, когда при горизонтальном положении достаточно длинной и закрытой с обоих концов трубы давление в ней близко к насыщенному, в то время при вертикальном положении внизу появляется конденсированная фаза. При воздействии механического поля расслаиваются растворы, существующие в ненарушенных условиях в гомогенном жидком виде (Федосеев, 2006).

Аппроксимируем установленные механизмы очагов сейсмических событий к направлениям региональных разломов и факторам исследуемых источников акротерм, полученным компонентным анализом, в зависимости от глубины очагов до и более 10 км.

По разломам хребтов Кастекский и Заилийский Алатау фиксируются взбросо-сдвиги и сдвиги; ближе к северной границе Илийской впадины – взбросы. По Кеминской группе разломов в северной части хребта Кунгей Алатау очаги характеризуются как сбросы и сдвиги (Ребецкий и др., 2016, Курмангалиева, 1993).

Механизму взбросов и взбросо-сдвигов отвечают факторы II, III по водопроявлению «Горельник», включающие дебит, температуру, pH, концентрацию Cl, газовый фактор, содержание He в растворимой и спонтанной формах. По водопроявлению «Алма-Арасан» указанному механизму соответствуют V и VI факторы, включающие дебит, температуру, гидрокарбонаты, pH, He, и содержание CO₂. По водопроявлению «Курам» процессу отвечают факторы V и VIII, включающие сочетание растворенного He, CO₂ и Rn с концентрацией F и Mg.

Механизму сбросов и сбросо-сдвигов соответствует фактор V по водопроявлению «Горельник», включающий Eh, pH, HCO₃, O₂ и CO₂ в газовом составе, концентрацию H₄SiO₄ и K. По источнику «Алма-Арасан» это IV и VI факторы: сочетание дебита, температуры, содержания макроанионов с концентрацией H₄SiO₄, радона, O₂ и Eh. По Курамскому источнику механизму растяжения отвечает IV фактор, состоящий из Eh, радона, содержания Cl, SO₄ и Mg.

Более точные и аргументированные рекомендации по оптимизации набора прогностических показателей на режимной сети азотных терм возможны после статистического анализа более длительного ряда наблюдений.

Список литературы

1. *Абдрахматов К.Е.* Современная блоковая структура Северного Тянь-Шаня. Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов //Сборник материалов Второго международного симпозиума (Москва–Бишкек, 29 октября – 3 ноября 2002 г.). Москва, 2003. С. 19–33.
2. *Зубович А.В.* Внутриконтинентальное горообразование в Центральной Азии по данным спутниковой геодезии / А.В. Зубович, В.И. Макаров, С.И. Кузиков, И.О. Мосиенко, Г.Г. Щелочков //Геотектоника. 2007. № 1. С. 16–29.
3. *Костюк А. Д.* Деформация земной коры северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии / А.Д. Костюк, Н.А. Сычева и др. // Физика Земли, 2010. № 3. С. 52–65.
4. *Крестников В.Н.* Напряженное состояние земной коры Центрального и Северного Тянь-Шаня / В.Н. Крестников, Е.И. Шишкин, Д.В. Штанге, С.Л. Юнга //Известия АН СССР, Сер. Физика Земли. 1987. № 3. С. 13–30.
5. *Курмангалиева А.Р.* Гидрогеохимический режим азотных щелочных терм Алма-Атинского сейсмоактивного района: автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. геол.-мин. наук. Алма-Ата. 1993. 24 с.
6. *Ребецкий Ю.Л.* Напряженное состояние коры северного Тянь-Шаня по данным сейсмической сети KNET / Ю.Л. Ребецкий, Н.А. Сычева и др. //Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 3. С. 496 – 520.
7. *Федосеев В.Б.* Влияние механических полей на состав, свойства и состояние многокомпонентных химических систем: автореф. дис. на соиск. уч. ст. доктора хим. наук. Нижний Новгород. 2006. 42 с.
8. *Чесалов С.М.* Классифицирование многомерных объектов в гидрогеологии на основе факторного анализа / С.М. Чесалов, А.П. Хаустов //Вестник Московского университета. Сер. Геологическая. 1986. № 1. С. 47-53.

New data on the features of the gas-chemical composition and temperature of thermal waters of the Kyrgyz Tien Shan (on the example of the thermal mineral waters of Jety-Oguz)

Dzhumagul Zh. Kendirbayeva

*Institute of seismology of the National Academy of the Sciences Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan
jumaevna48@gmail.com*

The results of a study of a wide range of thermal waters of the Kyrgyz Tien Shan are presented on the example of the Jety-Oguz section, where a sanatorium of the same name operates, and monitoring observations aimed at predicting strong earthquakes are used. In the spatio-temporal expression for a hydrogeothermal dome, in addition to the geothermal gradient and thermal conductivity of aquifers, the hydrodynamic conditions of geological sections play a decisive role – their water permeability is considered as one of the signs of unloading of thermal foci.

Keywords: thermal waters, aquifers and water-resistant layers, heat flux, high temperature and abnormal radioactivity, hydrogeothermic dome

Новые данные об особенностях газо-химического состава и температуры термальных вод Кыргызского Тянь-Шаня (на примере термоминеральных вод Джеты-Огуз)

Дж.Ж. Кендирбаева

Институт сейсмологии Национальной Академии наук Кыргызской Республики, Бишкек

Приводятся результаты изучения широкого спектра параметров термальных вод Кыргызского Тянь-Шаня на примере участка «Джеты-Огуз», где функционирует одноименная здравница, а также задействованы мониторинговые наблюдения, направленные для прогноза сильных землетрясений. В пространственно-временном выражении для гидрогеотермического купола, помимо геотермического градиента и теплопроводности водовмещающих пород, решающую роль играют гидродинамические условия геологических разрезов – их водопроницаемость рассматривается как один из признаков разгрузки тепловых очагов.

Ключевые слова: термальные воды, водоносные и водоупорные слои, тепловой поток, высокая температура и аномальная радиоактивность, гидрогеотермический купол

Сочетание повышенной температуры и минерализации с высокой радиоактивностью и широкими пределами колебаний ионного состава термоминеральных вод Джеты-Огуз обуславливает вопросы изучения условий их формирования и распространения многогранными и актуальными. В решении поставленных задач именно тектонические разрывы представляют большой интерес, т.к. они на высоких гипсометрических отметках и в различных геологических разрезах сформировали подземный сток, резко отличающийся от других гидропроявлений Кыргызского Тянь-Шаня в целом.

На территории рассматриваемого региона, расположенного на северном склоне хр. Тескей Ала-Тоо, основным структурным элементом является одноименная брахиантиклиналь, которая простирается параллельно хр. Тескей Ала-Тоо, т.е. с юго-запада на северо-восток. Ее длина при ширине около 3-х км составляет 6 км. Различная раздробленность, а также дифференцированная активность горизонтальных и вертикальных перемещений тектонических блоков создали пеструю обстановку геологического строения. В геологическом строении принимают участие метаморфические и интрузивные образования, в которых гидрогеологические условия детально изучены многими

исследователями, в т.ч. Васильевой В.В. (1959). По ее мнению, термы приурочены к изолированной части мезо-кайнозоя, т.е. очаг разгрузки нагретых вод локализован контактно-эрозионной зоной за счет глубокого вреза в долину и сопряжения водоносного карбона с водоупорным перекрытием мезо-кайнозоя. При этом допалеозойские породы, прорезанные р. Джеты-Огуз, обнажаются в ядре складки, которые, прерывая каледонские граниты, обводнены также выше эрозионного вреза: об этом свидетельствуют многочисленные родники: расходы составляют 3,0-3,5 л/сек, а воды при минерализации до 0,5 г/л по химическому составу - гидрокарбонатный кальциевый.

Здесь, действительно, разрывными нарушениями разной направленности образованы узлы пересечения, представленные взбросо-сдвигами, системами продольных и поперечных крутопадающих сбросов, а также флексурами в известняках карбона и кварцитах метаморфической толщи. Для этого наиболее интересны субмеридиональный Каракольский надвиг и одноименный глубинный разлом.

С нашей позиции [1], первой структурой созданы благоприятные условия для формирования «азонального» гидропотока, характеризующегося высокой температурой и аномальной радиоактивностью. Он, независимо от разнообразия химического состава, по содержаниям радиоактивных элементов разделен на три группы: первая – радиевая, преимущественно радоновая, вторая – радиевая, но бедная радоном и третья – высоко радоновая. Яркими свойствами последней обладают горячие воды, у которых высокая минерализация совпадает с наличием галогенных соединений в разрезе, а именно, каменной соли. Как видно из рис. 1, на геолого-тектоническую основу нанесены пять скважин, вскрывшие самоизливающиеся термальные и теплые воды с широким спектром химического состава.

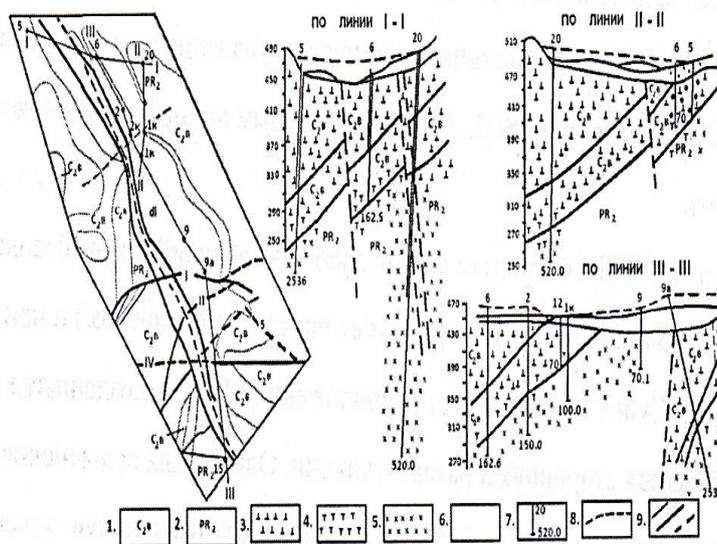


Рисунок 1 – Геолого-гидрогеологическая схема участка термальных вод «Джеты-Огуз». Условные обозначения:

- 1 – песчаники и глинистые сланцы бакирского яруса среднего карбона.
- 2 – кварциты, слюдяные сланцы и роговики допалеозоя. Химический состав и минерализация (г/л) термальных вод; 3 – хлоридный натриево-кальциевый с $M \geq 10$;
- 4 – хлоридно-сульфатный натриево-кальциевый с $M = 3-5$;
- 5 – хлоридно-сульфатный натриево-кальциевый с $M \leq 3,0$;
- 6 – гидрокарбонатный кальциевый $c \leq 0,5$;
- 7 – скважины на карте и в разрезе: цифры - сверху номер, внизу - глубина (м);
- 8 – пьезометрический уровень вод;
- 9 – тектонические разломы

Большинство исследователей при рассмотрении происхождения высокой температуры вод Джеты-Огуз признавали о наличии нормального геотермического режима в этой части артезианского бассейна, этим самым, указывая на их внедрение с глубин. Для высокогорных областей, исходя из общей геотермической ступени, допускается, что она выше 30 м. Например, по мнению Бедера В.В., величины геотермической ступени (м) в Ферганском бассейне колеблются от 30 до 44, в Приташкентском – от 29 до 43, а в Сурхандарьинском – от 30 до 36. С учетом этого, для ориентировочного расчета глубины формирования изучаемых терм значения геотермической ступени приняты 33 м. В этом случае, температура, превышающая максимальной температуры джеты-огузских высокоминерализованных (13 г/л) вод (45 °С) над среднегодовой температурой воздуха (+3 °С) соответствует глубине порядка 1400 м, а длина пути движения к поверхности земли,

при угле падения 30° образований карбона (С), составит 2,8-3,0 км, а наименьшее расстояние от основного очага разгрузки до склона артезианского бассейна – около 2,2 км.

Благодаря прогреванию восходящими термами окружающих пород образуется гидрогеотермический купол, тепловой режим в котором определяется не столько региональными закономерностями, сколько конкретными условиями выноса теплового потока. По нашим расчетам суточный расход теплового потока в джеты-огузских водах с температурами на выходе 43°C и дебитом около 10 л/сек, составляет 40 млн. ккал, т.е. равен количеству тепла, получаемого при сжигании 5 т антрацита.

Иными словами, на самом деле геотермальная аномалия, связанная с локальной разгрузкой терм, выше, чем нормальное геотермическое поле. Об этом свидетельствуют данные геотермических наблюдений, проводившихся в процессе бурения скважин, а именно, величины геотермических ступеней, варьирующиеся от долей метра на этом участке до 46 метров за пределами очагов разгрузки термальных вод. На самом участке основной термальный поток, благодаря наличию геотермальной аномалии в локальных зонах глубинного тектонического разлома, пересекающего правый борт одноименной речной долины, направлен в соответствии с общим падением горных пород под углом к поверхности земли. Для этого, с другой стороны, помимо геотермического градиента и теплопроводности вмещающих пород, решающую роль играют водопроницаемость геологических разрезов, в связи с чем гидродинамические условия рассматриваются как один из признаков пространственного распределения тепловых ресурсов [2,3].

Характерной чертой ионно-солевого состава терм является высокое содержание кальция, указывающее на обменно-адсорбционные процессы, интенсивно происходящие на пути их движения, по-видимому, снизу-вверх. Это, вне сомнения, свидетельствует о том, что из глубоких частей земной коры продолжает поступать тепловой поток в виде перегретых вод, которые на пути своего движения вверх обогащаются многими микроэлементами и газами, например, изотопами гелия, аргона и дейтерия, а для высокоминерализованных представителей свойственны значения хлор-бромного коэффициента, намного превышающие в морских водах. Последние несут на себе вполне четкие признаки восстановительной геохимической обстановки, характерные глубоким частям закрытых артезианских бассейнов. Поэтому нами обращено особое внимание на ионный и газовый состав рассматриваемых терм [4,5]. К ним относятся газовый состав, представленный азотом с примесями метана и углекислого газа, высокое соотношение восстановительной формы железа к его окисленной форме, а также четкий сдвиг радиево-уранового равновесия, т.е. обогащенность радием.

Наибольшей концентрацией радона обладают самые высокоминерализованные и горячие воды, выведенные на поверхность земли скважиной № 6, находящейся в центральной части участка разгрузки. Это, вне сомнения, свидетельствует о том, что через эманурующий коллектор проходит по термовыводящему каналу часть высокоминерализованных терм, которая поступает в речную долину. Этому способствуют затрудненные условия водообмена и высокая температура, а также значительное содержание хлоридов кальция в термах, которые, как известно, весьма благоприятны для первичной миграции радия из твердой фазы в жидкую среду. Именно они, увеличивая выщелачиваемость радия, снижают его адсорбции вмещающими породами. В этом плане выявлена интересная идентичность физико-химических параметров изучаемых терм с таковыми сопутствующих вод в скважинах, опробованных на нефтяных месторождениях Припятского авлакогена в далекой Белоруссии. Например, последние, как джеты-огузские термы, при близком ионно-солевом составе высоко минерализованы и термальные, а также радиоактивны. Они, зарождаясь в допалеозойском фундаменте и разгружаясь в карбонатных породах девона, создают коллектора для нефти.

Итак, джеты-огузские высокоминерализованные термы Кыргызского Тянь-Шаня – метаморфизованные воды южного крыла Восточно-Иссык-Кульского артезианского бассейна, идущие к очагам разгрузки из известняков карбона, которые, формируясь в зоне

Каракольского нарушения, на дневную поверхность выходят по Джеты-Огузскому разлому. Если литологические особенности водовмещающих пород – наличие алевролитовых слоев в известняках и слюдястых сланцев в метаморфических толщах одинаково благоприятны, то скорости циркуляции вод в разных частях неоднородны, в т.ч. и длительность их контакта с породами. Дело в том, что обменные процессы при достаточно длительной циркуляции вод со временем постепенно затухают, а там, где появляются новые пути внедрения, активизируются.

В очаге разгрузки изучаемых терм происходят также процессы смешения между теплыми и слабоминерализованными сульфатно-хлоридными натриевыми и сульфатно-гидрокарбонатными кальциево-натриевыми водами с высокоминерализованными хлоридными кальциево-натриевыми термами. Первые, широко распространенные в коренных породах, выступают как гидрогеохимический фон, который из неглубоких водоносных слоев регионально дренирует геохимическую общность, тогда как аналогичные черты высокотермальных вод, пространственно тяготея к карбонатным известнякам, осложняющим условия их разгрузки, связаны с глубинными разломами.

Выводы

На этой основе допускаем наличие геотермического купола, у которого тепловой режим обязан геолого-тектоническим особенностям, а геохимический облик вод – не только выщелачиваемости соленосных образований, но и поступлению глубинных флюидов.

Список литературы

1. *Кендирбаева Дж.Ж.* Основные принципы регионального анализа гидрогеологической системы Кыргызстана как источника информации прогноза землетрясений //Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2013. № 2 (2). С. 35–45.

2. *Кендирбаева Дж.Ж.* О взаимосвязи геотермических условий и геохимической обстановки Кыргызского Тянь-Шаня / Дж.Ж. Кендирбаева, В.В. Гребенникова // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле Земли, интерпретация геофизических полей. Екатеринбург. 2013. С. 145–147.

3. *Кендирбаева Дж.Ж.* Гидрогеохимические показатели разрывно-блоковой делимости Кыргызского Тянь-Шаня (на примере Иссык-Кульского артезианского бассейна) //Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2015. № 2 (6). С. 51–59.

4. *Кендирбаева Дж.Ж.* О геохимии термоминеральных вод и эндогенных флюидов Кыргызского Тянь-Шаня. // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. 2017. С. 153–158.

5. *Кендирбаева Дж.Ж.* Гидротермальные системы Кыргызского Тянь-Шаня как отражение теории пульсирующей Земли. //Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation «Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology» (Geothermal Volcanology Workshop 2019. Petropavlovsk-Kamchatsky, Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, 04 – 09 September, 2019), Petropavlovsk-Kamchatsky. 2019. P. 171–175.

CHAPTER IV. MAGMATIC FEEDING SYSTEMS OF ACTIVE VOLCANOES

РАЗДЕЛ IV. МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ДЕЙСТВУЮЩИХ ВУЛКАНОВ

УДК 551.214

Shallow magmatic hydrothermal eruption in April, 2018 on Ebinokogen-Ioyama volcano in Kirishimavolcano group, Kyushu, Japan

**Yasuhisa Tajima¹, Setsuya Nakada^{2,3}, Fukashi Maeno³, Toshio Huruzono⁴, Masaaki Takahashi⁵,
Akihiko Inamura⁵, Takeshi Matsushima⁶, Masashi Nagai² and Jun Funasaki⁷**

¹*Research & Development Center, Nippon Koei Co., Ltd., Tsukuba, 300-1259, Japan
yasuhisa79@gmail.com*

²*National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, Tsukuba, 305-0006, Japan*

³*Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Tokyo, 113-0032, Japan*

⁴*Kirishima Nature Guide Club, Kobayashi, 886-0004, Japan*

⁵*Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,
Tsukuba, 305-8567, Japan*

⁶*Institute of Seismology and Volcanology Faculty of Science, Kyushu University; Shimabara, 855-0843, Japan*

⁷*Miyazaki Local Meteorological Observatory (former), Miyazaki, 880-0032, Japan*

Kirishima volcano group is a volcanic field ideal for studying the mechanism of steam-driven eruptions because many eruptions of this type occurred in the historical era and geophysical observation networks have been installed in this volcano. Geothermal activity resumed around the Ioyama from December 2015. A steam blowout occurred in April 2017, and a hydrothermal eruption occurred in April 2018. Geothermal activity had gradually increased before these events, suggesting intrusion of the magmatic component fluids in the hydrothermal system under the volcano. The April 2018 eruption was a magmatic hydrothermal eruption caused by the injection of magmatic fluids into a very-shallow hydrothermal system as a bottom-up fluid pressurization, although juvenile materials were not identifiable. Additionally, the upwelling of mixed magma-meteoric fluids to the surface as a kick was observed just before the eruption to cause the top-down flashing of April 2018. A series of events was generated in the shallower hydrothermal regime consisting of multiple systems divided by conductive caprock layers.

Keywords: Kirishima volcano group; Ebinokogen-Ioyama volcano; multiple hydrothermal system; magmatic hydrothermal eruption; kick upwelling

Малоглубинное магматическое гидротермальное извержение апреля 2018 года на вулкане Эбинокоген-Иояма, группы вулкана Киришима, острова Кюсю, Япония

**Ясухиса Таджима¹, Сэцую Накада^{2,3}, Фукаши Маэно³, Тошио Хурузоно⁴, Масааки Такахаси⁵,
Акихико Инамура⁵, Такеша Мацусима⁶, Масаси Нагаи² и Дзюн Фунасаки⁷**

¹*Центр исследований и разработок, Япония*

²*Национальный исследовательский институт наук о Земле и противодействие бедствиям, Цукуба, Япония*

³*Институт исследования землетрясений, Токийский университет, Токио, Япония*

⁴*Клуб природных гидов Киришимы, Кобаяси, Япония*

⁵*Геологическая служба Японии, Национальный институт передовых промышленных наук и технологий, Цукуба, Япония*

⁶*Институт сейсмологии и вулканологии, факультет естественных наук, университет Кюсю;
Симабара, Япония*

⁷*Местная метеорологическая обсерватория Миядзаки, Япония*

Вулканическая группа Киришима - это вулканическое поле, идеально подходящее для изучения механизма гидротермальных извержений, так как многие извержения такого типа происходили в историческую эпоху, и на этом вулкане были установлены сети геофизических наблюдений. С декабря 2015 года вокруг Иоямы возобновилась геотермальная активность. В апреле 2017 года произошло извержение пара, а в апреле 2018 года – гидротермальное извержение. До этих событий геотермальная активность постепенно возрастала, что свидетельствует о вторжении флюидов магматического компонента в гидротермальную систему под вулканом. Апрельское извержение 2018 г. представляло собой магматическое гидротермальное извержение, вызванное инъекцией магматических флюидов в приповерхностную гидротермальную систему в качестве флюидного давления снизу вверх, хотя ювенильный материал идентифицировать не удалось. Кроме того, непосредственно перед извержением наблюдалось подьём на поверхность смешанных магма-метеорных флюидов в качестве триггера, что вызвало закипание сверху вниз в апреле 2018 года. В приповерхностном гидротермальном резервуаре, состоящем из нескольких систем, разделенных проводящими слоями породы, произошло несколько извержений.

Ключевые слова: Группа вулканов Киришима; вулкан Эбинокотен-Иояма; мульти-гидротермальная система; магматическое гидротермальное извержение; восходящая активизация

1. Introduction

The general nomenclature for steam-driven eruptions is categorized into two types as hydrothermal and phreatic eruptions (Browne and Lawless, 2001). Other, one of the triggers of eruption in general may be pressurization of a hydrothermal system heated by input of magmatic fluids from the depths (bottom-up gas/fluid pressurization). And the trigger is decompression of the hydrothermal reservoir for external reasons. For example, a water level drop, drilling or a landslide can cause the flashing from the top to downward (top-down flashing) (e.g., Montanaro et al., 2020). In fact, the caprock structure is considered important for storing hydrothermal liquids. The caprock formation of silica or hydrothermal minerals is considered to be the layer that controls the sealing and release of hydrothermal fluids within different depths of a volcanic edifice. In Kirishima volcano group, steam-driven eruptions have been dominant at Ebinokogen Ioyama volcano over the long term, and there has been geothermal activity around there in recent times (Tajima et al., 2014). In Ebinokogen Ioyama volcano, this conductive layer is located 200 to 700 m below the surface, with a pressure source below it (Tsukamoto et al., 2018). We recorded the activity just before the latest steam-driven eruption at Ebinokogen Ioyama volcano in April 2018. Here, we discuss the sequence of geothermal activity and the possible phenomenology, especially focusing on the hydrothermal aquifer depth and the precursory signals of the eruption. This workshop abstract based on Tajima et al. (2020).

2. Relationship between geothermal activities and underlying geothermal system

The conductive caprock layer with a low resistivity of $<1 \Omega\text{-m}$ at depths from 200 to 700 m was considered to have smectite as its main altered mineral. It is suggested that the conductive layer behaved as a caprock preventing the up-flow of pressurized hydrothermal fluids. This caprock, likely corresponding to a low permeable layer, can explain the activity sequence from Stage-1 to Stage-4.

In the Stage-1, A volcanic tremor event lasting 7 min was observed beneath Ebinokogen Ioyama volcano on 20 August 2014. The seismic activity tended to gradually increase in 2015, swarmed in July, and tremor events were observed from July to October. Deeper pressure source, likely related to a magma reservoir, is present between 8 and 10 km below Ebinokogen. Magmatic fluids might start to be supplied from the deeper parts under Karakunidake to the shallow hydrothermal system. The volcanic tremor event that took place, may represent the beginning of the activation of the shallow hydrothermal system under the conductive caprock. The period from December 2013 to December 2015, as no manifestation was observed at the surface in this stage, it is hypothesized that the fluid-driven heating and pressurization of the shallow hydrothermal system beneath the Ioyama-fumarole area developed gradually.

In the Stage-2, on the afternoon of 14 December 2015, a hiker found a very small fumarole on the southwest rim of the Ioyama old crater at a point. Since then, the area with a thermal anomaly expanded north and east, mainly in the southern part of the Ioyama lava. From December

2015 to January 2017, there was small expansion of the thermal anomaly area, but temperatures of the fumaroles remained about 96 °C. The relationship between the δD and the $\delta^{18}O$ ratio showed that the water from a spring at this stage was derived from the meteoric water. Most likely the high-temperature hydrothermal fluids accumulated below a depth of 600 to 700 m started to percolate through the conductive caprock layer during Stage-2.

In the Stage-3, the geothermal anomaly area expansion rate increased from early 2017 and continued until early summer 2017. The mud pot A was observed at the point A on 19 March, and another pot appeared at F between 19 and 21 March. The jet fumarole H, 30 m east of the mud pot F, started roaring between 15 and 18 April. Then the jet fumarole vent A with a 1.5 m diameter was first observed about 10 m away from the mud pot A on 5 May. The area near the jet fumarole vent A was covered with a thin layer of light gray ash-sized altered material (ashy deposit) with block-sized altered host rock ejecta over a distance of a few meters. The altered material ashy deposit was blown out from the jet fumarole vent A around 11:29 am on 26 April. The high rates of geothermal activity at the jet fumarole vents continued until July 2017. The temperature of the jet fumarole H was 134.2 °C on 24 September 2017. Hydrothermal minerals of the blowout deposit from the jet fumarole A contained mostly quartz and Na-alunite and almost no smectite. The 2017 blowout event at the jet fumarole A with the products abundant in alunite can be considered as a phenomenon that originated from low pH hydrothermal liquids at a very shallow depth (mostly up to a depth of 100 m).

In the Stage-4, the expansion of the geothermal anomaly area resumed around February 2018. The fumarole S appeared about 30 m south of the Ioyama-fumarole area on 3 February 2018. The first sign, just 12 days before the eruption, was the appearance of the hydrothermal pond Y1 on 7 April 2018. An eruption began on the south side of Ioyama at 3:39 pm on 19 April. It took place first at a vent near the fumarole, and almost immediately another vent opened, expelling vigorous white steam moving about 30 m northeast from the first vent. Both vents appeared almost simultaneously within a span of one minute, and the vigorous steams developed into white to pale gray-white plumes with heights of 100 to 200 m. The vents S1 to S7 observed on 19 and 20 April. However, S1 and S7 subsequently became the three larger depression-shaped craters (Ioyama south craters: Y2a, Y3, Y2b). The deposit thickness of the 19 April 2018 eruption ejecta varied from a few centimeters to 45 cm of the Ioyama-south craters. It was reported that the steaming could have started at a distance 500 m west of the Ioyama-south craters on the evening of 20 April as Ioyama-west crater. The smectite content of the 2018 eruption deposit was about 1 wt%, implying that the April 2018 eruption originated from a smectite depleted hydrothermal environment. The hydrothermal pond Y1 appeared on 7 April, and a large amount of hydrothermal fluids gushed out. The relationship between δD and $\delta^{18}O$ ratio of the water in the Y1 pond just before the eruption indicated that the pond liquid was a mixture of meteoric and magmatic liquids, creating an environment in which both end member liquids probably mixed. Thus, geological and geochemical observations show that the main excavation of the 2018 eruption may have been at a very shallow depth around the top of conductive layer.

3. A kick sign before the April 2018 eruption

During the events of March to April 2017, the jet fumarole A blew out on 26 April, after the appearance of the mud pot A just before/on 19 March. The jet fumarole A blew out about a ten meter away from the mud pot A. Furthermore, welling-up of a large amount of fluids in the hydrothermal pond Y1 continued for 12 days immediately before the steam-driven eruption on 19 April, 2018 at Ioyama south craters. The locations of the upwelling of hydrothermal fluids and of the eruption were about 60 m apart. In summary, the pressurization of hydrothermal system is considered to be caused first as a bottom-up. The increase in fumarolic activity and the spring K3 temperatures from February 2018 indicated that the magmatic liquids were supplied to the very-shallow hydrothermal system. Second, hydrothermal fluids were observed to comprise mixed magmatic and meteoric waters up-welled at the Y1 just before the eruption in April 2018. We conclude that an initial bottom-up fluid pressurization (kick) destabilized the shallow part of the hydrothermal system, producing a boiling-front that penetrated downwards into the hydrothermal reservoir, followed by the explosion according to a top-down mechanism. Thus, rapid increases in

the geothermal manifestation over a short period of time, as in the case of Ebinokogen Ioyama volcano, should be taken as a sign for caution in geothermal areas.

4. Issues of steam-driven eruptions for the volcanic disaster prevention

The magmatic hydrothermal eruption at Ioyama in April 2018 may have involved hydrothermal liquids shallower than 350 m depth. Locations of the fumarole S and the Y1 hydrothermal pond at Ebinokogen Ioyama may be possible sites for future eruption. The 2014 eruption at Ontake volcano in central Japan is considered one example of an abrupt departure from equilibrium conditions (Oikawa et al., 2016). The question remains, what may be the signs of energetic steam driven eruption. Kato et al. (2015) proposed that hot fluids infiltrated to cracks from the deeper magma chamber in middle September 2014 before the September 27 phreatic eruption in Ontake. In case of Ebinokogen Ioyama in 2018, it took over two months for magmatic fluids to be supplied into shallow hydrothermal system before the eruption from the deep system. In Ebinokogen Ioyama, the supplied amount and rate of magmatic fluids of the 2018 eruption may be much smaller than the 2014 eruption in Ontake. And more energetic steam-driven eruptions may occur in this area if larger amount of magmatic fluid is injected rapidly and a wider area of the shallow hydrothermal system is destabilized.

A hydrothermal eruption occurred from the Ioyama-south craters on 19 April 2018. The next day, vents (Ioyama-west crater) formed 500 m away from the Ioyama-south craters. Given that the tourist facility is relatively close to the potential venting area, in addition to addressing the 19 April vents, there is also the need to highlight the occurrence of the 20 April.

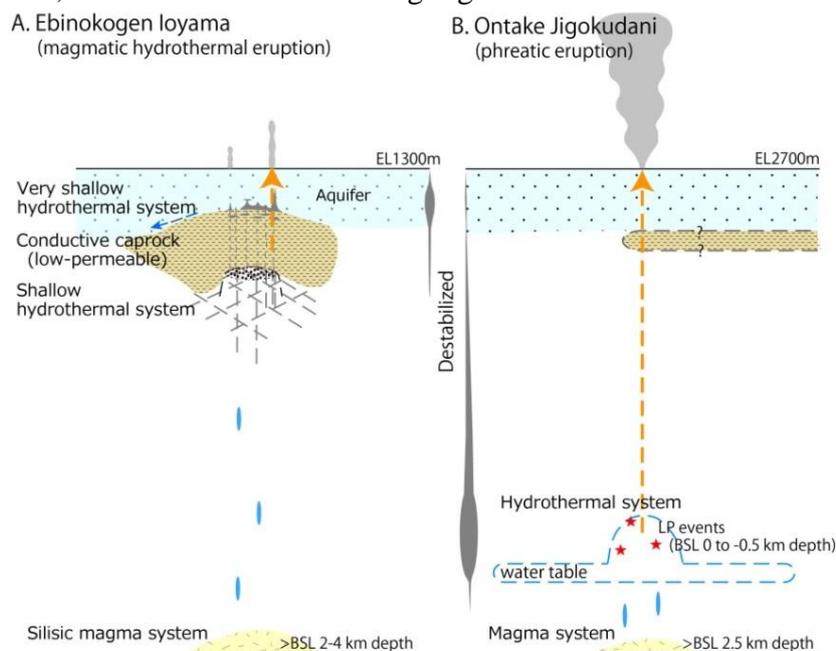


Figure 1 – Comparison of conceptual models of hydrothermal systems between Ebinokogen Ioyama and Ontake Jigokudani. A. Conceptual hydrothermal supply system of 2018 magmatic hydrothermal eruption at Ebinokogen Ioyama volcano. (Tajima et al., 2020) B. Conceptual hydrothermal supply system of 2014 phreatic eruption at Ontake volcano. (Kato et al., 2015)

References

1. Browne P.R.L. Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere / P.R.L. Browne, J.V. Lawless // *Earth Sci. Rev.* 2001. 52. P. 299–331.
2. Kato, A. Preparatory and precursory processes leading up to the 2014 phreatic eruption of Mount Ontake, Japan / A. Kato, T. Terakawa, Y. Yamanaka, Y. Maeda, S. Horikawa, K. Matsuhiro, T. Okubo // *Earth Planet. Space.* 2015. (67). P. 111.
3. Montanaro, C. Complex crater fields formed by steam-driven eruptions: Lake Okaro, New Zealand / C. Montanaro, S. Cronin, B. Scheu, B. Kennedy, B. Scott // *GSA Bull.* 2020. P. 1–17.
4. Oikawa, T. Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews / T. Oikawa, M. Yoshimoto, S. Nakada, F. Maeno, J. Komori, T. Shimano, Y. Takeshita, Y. Ishizuka, Y. Ishimine // *Earth Planet., Space.* 2016. 68. P. 489.

5. *Tajima, Y.* Eruptive history of Ebinokogen volcanic area of Kirishima volcanoes for the past 15,000 years in Kyushu, Japan / Y. Tajima, Y. Matsuo, T. Shoji, T. Kobayashi // *Bull. Volcanol. Soc. Jpn.* 2014. 59. P. 55–75.

6. *Tajima, Y.* Shallow magmatic hydrothermal eruption in April 2018 on Ebinokogen-Ioyama Volcano in Kirishima Volcano Group, Kyushu, Japan / Y. Tajima, S. Nakada, F. Maeno, T. Huruzono, T. Takahashi, A. Inamura, T. Matsushima, M. Nagai, J. Funasaki // *Geosciences*. 2020. 10. P. 183.

7. *Tsukamoto, K.* Three-dimensional resistivity structure of Iwo-yama volcano, Kirishima volcanic complex, Japan: Relationship to shallow seismicity, surface uplift, and a small phreatic eruption / K. Tsukamoto, K. Aizawa, K. Chiba, W. Kanda, M. Ueshima, T. Koyama, M. Utsugi, K. Seki, T. Kishita // *Geophys. Res. Lett.* 2018. P. 45.

УДК 551.214

Silent dome emplacement into a wet volcano: White Island (Whakaari), New Zealand 2012

Arthur Jolly¹, Corentin Caudron², Tàrsilo Girona³, Bruce Christenson⁴, Roberto Carniel⁵

¹*GNS Science, Avalon, Lower Hutt, New Zealand
A.Jolly@gns.cri.nz*

²*Université Grenoble Alpes, Université Savoie Mont Blanc, France*

³*Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA*

⁴*GNS Science, Gracefield, Lower Hutt, New Zealand*

⁵*Laboratorio di Misure e Trattamento dei Segnali, DPIA, University of Udine, Udine, Friuli, Italy*

A detailed retrospective analysis of the spectral characteristics of one broadband seismic station operated by the New Zealand GeoNet project has been carried out. He revealed the presence of the so-called "Sliding spectral lines" in the range of seismic data for the period after the eruption on about. Fakaari (White Island) in August and early December 2013.

Keywords: eruption, wet volcano, spectral analysis, magma, dome

«Бесшумная» выжимка купола в водонасыщенный вулкан: остров Уайт (Вакаари), Новая Зеландия

Артур Джолли¹, Корентин Кодрон², Тарсилло Жирона³, Брюс Кристенсон⁴, Роберто Карниэль⁵

¹*Королевский научно-исследовательский институт GNS Science, Авалон, Новая Зеландия*

²*Университет Гренобль Альпы, Университет Савойя Монблан, Франция*

³*Лаборатория реактивного движения, Калифорнийский технологический институт, Пасадена, США*

⁴*Королевский научно-исследовательский институт GNS Science, Грейсфилд, Новая Зеландия*

⁵*Лаборатория измерений и обработки сигналов, Университет Удине, Удине, Италия*

Впервые загадочная выжимка купола наблюдалась на острове Вакаари (Белый остров) в начале декабря 2013 года. Эффузивное извержение было зафиксировано в тыловой части активной эруптивно-кратерной системы (рис. 1), и его наблюдение относилось примерно к 3-месячным очень низким уровням сейсмической активности. Наличие мелководного кратерного озера в этот период свидетельствует об активной гидротермальной системе на острове Whakaari, что было задокументировано в исторические времена. Действительно, эта гидротермальная система вулкана, возможно, существовала в течение тысячелетий до начала научных исследований европейцев, поскольку вулкан и его геотермальные особенности являются важным маорийским таонга или природным сокровищем, которые были частью устных традиций на протяжении многих поколений до европейского наблюдения.

Ключевые слова: извержение, подводный вулкан, спектральный анализ, магма, купол

Загадочное купольное извержение на о. Факаари (Уайт-Айленд) впервые наблюдалось в начале декабря 2013 года. Извержение эффузивного типа проходило на задней стороне действующей конусно-кратерной системы (рис. 1), а наблюдения велись в течение примерно 3 месяцев низкой сейсмической активности. Существование мелководного кратерного озера в этот период свидетельствует о наличии действующей гидротермальной системы на острове, о чём имеются исторические доказательства. Действительно, эта гидротермальная вулканическая система вполне могла существовать на протяжении тысячелетий вплоть до западных исследователей, поскольку и вулкан, и его геотермальные проявления являются *таонга* (природным достоянием) для народа маори, будучи частью их устных преданий задолго до европейских исследователей.

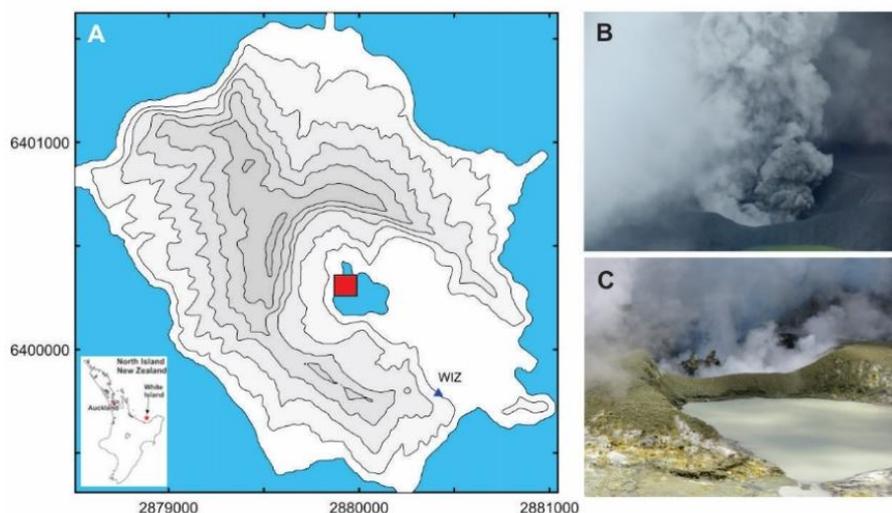


Рисунок 1 – Карта о. Уайт-Айленд на юго-востоке бухты Бей-оф-Пленти. Широкополосный сейсмический датчик WIZ (голубой треугольник), конус купольного извержения (красный квадрат) и конус юго-восточного извержения (красный квадрат) показаны на (А). Выброс пепла из конуса 5 августа в постэруптивный период. Купол показан на снимке (С), и был сфотографирован ориентировочно 9 декабря. Фотография (В) предоставлена GeoNet без указания авторства, в то время как снимок (С) сделан Брэдом Скоттом и предоставлен GeoNet

До начала внедрения купола магматическая и гидротермальная системы вулкана вышли из режима покоя, возможно, уже в августе 2011 года (Chardot et al., 2015), когда был зарегистрирован рой вулканических землетрясений, включая парные сверхдлиннопериодные, длиннопериодные и высокочастотные сейсмические события (Jolly et al, 2017). За этими событиями последовало незначительное увеличение амплитуды сейсмической волны (RSAM) кульминаций которой стало первое из шести фреатических и фреатоматматических событий 5 августа 2012 года, примерно за 4 месяца до процесса появления купола.

Подробный ретроспективный анализ спектральных характеристик одной из широкополосных сейсмических станций (WIZ), эксплуатируемой новозеландским проектом GeoNet, выявил существование т.н. «скользящих спектральных линий» (например, Powell et al., 2003; Hotoves, 2013) в диапазоне сейсмических данных за период после извержения 5 августа и наблюдаемом появлении купола в начале декабря. В то время как предыдущие примеры «скольжения» были ограничены продолжительностью от нескольких минут до нескольких часов, в случае с о. Уайт-Айленд ситуация развивалась очень медленно и сохранялась в течение 3 месяцев (рис. 2).

Медленная эволюция сейсмичности наряду с ограничивающими условиями гидротермальных и малоглубинных магматических систем в некоторой степени ограничивают процесс тремора. Система наложения состоит из магматического канала на очень небольшой глубине, который обеспечивает теплом и флюидами вышележащую гидротермальную систему, которая динамически приводится в действие конвективным перемешиванием. Гидротермальная система состоит из флюидов в трех основных фазовых

состояниях, включая однофазный газ, двухфазную жидкость/газ и однофазную жидкость. Эти фазовые состояния вносят важный вклад в скорость акустической волны и резонансные свойства пустот и полостей в малоглубинной приповерхностной среде.

Мы уделяем наибольшее внимание трём процессам, которые могут возникнуть на границе распространяющегося или извергнутого объема магмы, включая: 1) заполненную пузырьками полость, 2) повторяющийся процесс прерывистого сдвига пород или 3) проницаемый поток внутри вспененного расширяющегося гидротермального фронта.

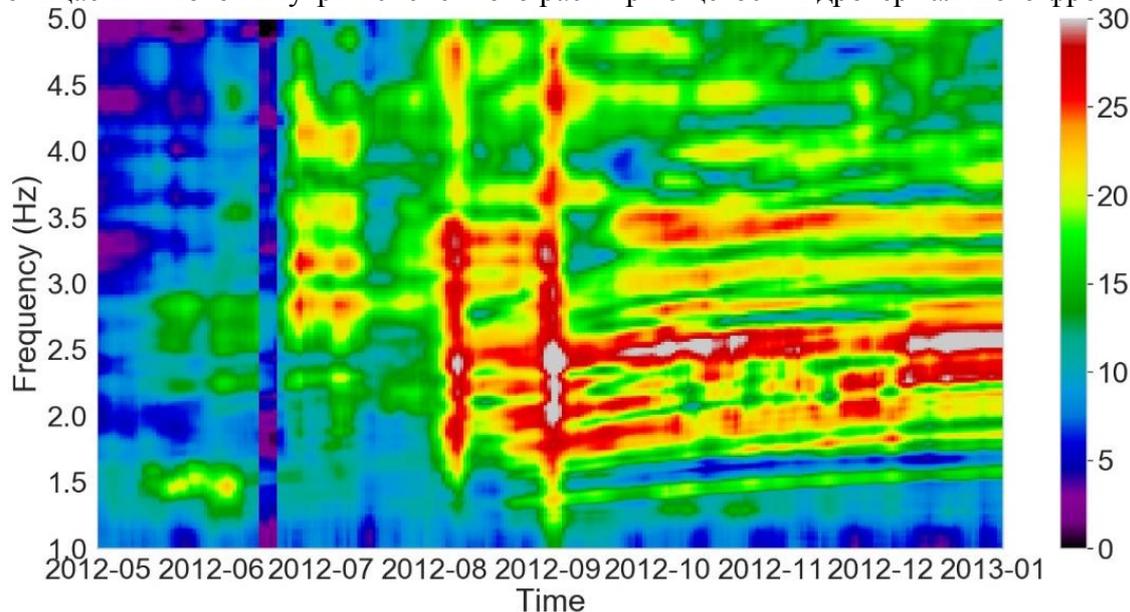


Рисунок 2 – Спектрограмма, вычисленная с использованием двухминутных промежутком после удаления среднего значения, сдвига и применения косинусного сужения на каждом промежутке. Амплитуды показаны цветной полосой

Заполненные пузырьками полости были вызваны как часть резонансного процесса на многих вулканах (например, Chouet, 1985), а заполненные магмой трещины или геометрия каналов могут с большой долей вероятности вызвать пиковый резонансный тремор. Изменения в геометрии канала или свойствах жидкости могут изменить спектральный состав и, следовательно, могут привести к «скользящим спектральным линиям». Следует отметить, что наблюдения на Факаари меняются очень медленно, и неясно, могут ли такие медленно развивающиеся изменения иметь отношение к возможным резонансным свойствам полости, которые там наблюдаются.

Далее, мы полагаем, что процесс прерывистого разрыва был вызван у стенки канала магмы как часть процесса магматического потока. Он может отражать внезапное изменение свойств вблизи стеклования магмы, когда вязкость магмы внезапно увеличивается (Neuberg et al, 2006). Предполагалось, что такой процесс протекал на Суфриер-Хилс как часть быстрого увеличения дискретной сейсмичности землетрясений, что, в свою очередь, выражается в виде «эффекта гребёнки». В этом случае увеличение частоты отдельных землетрясений способствует наблюдаемому изменению спектральных частот, видимых в форме скользящих спектральных линий.

В-третьих, мы рассматриваем вспененный расширяющийся гидротермальный фронт согласно Girona et al. (2019), где вспененная часть гидротермальной системы с пузырьками питает проницаемую крышку (например, «протекающую крышку») в систему. Давление в системе регулируется нелинейным осциллятором, который сводится к линейному осциллятору для зоны с высокой трещиноватостью с проницаемой крышкой. Хотя модель проницаемой крышки с постепенной подачей воды может быть возбуждена самосрабатывающим механизмом, как описано выше для модели прерывистого скольжения, спонтанное возбуждение проницаемой крышки также возможно.

Для всех трех моделей, описанных выше, мы не наблюдаем признаков дискретных землетрясений в данных сейсмического сигнала. Вместо этого мы рассматриваем наиболее вероятную последовательность событий как раннюю медленную интрузию магмы через магматическую систему (вероятно, с начала сентября). Два возможных механизма кажутся правдоподобными: дайка могла быть образована ранее и, медленно остывая, вызывала медленное изменение системы магматических полостей и наблюдаемой прогрессии скользящих спектральных линий; или же распространяющаяся дайка могла медленно двигаться вдоль постепенно поднимающейся к поверхности проницаемой вспененной крышки (Girona et al, 2019).

Список литературы

1. Chardot, L. Using volcanic tremor for eruption forecasting at White Island volcano (Whakaari), New Zealand. / L. Chardot, A.D. Jolly, B. Kennedy, N. Fournier, S. Sherburn // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. 302. P. 11–23, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2015.06.001.
2. Chouet, B. Excitation of a buried magmatic pipe: A seismic source model for volcanic tremor // *J. Geophys. Res.* 1985. P. 90. 1881–1893, DOI: 10.1029/JB090iB02p01881.
3. Girona, T. Origin of shallow volcanic tremor: The dynamics of gas pockets trapped beneath thin permeable media / T. Girona, C. Caudron, C. Huber // *J. Geophys. Res.* 2019, DOI: [10.1029/2019JB017482](https://doi.org/10.1029/2019JB017482).
4. Hotovec, A.J. Strongly gliding harmonic tremor during the 2009 eruption of Redoubt Volcano / A.J. Hotovec, S.G. Prejean, J.E. Vidale, J. J. Gomberg // *Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. 259. 89–99.
5. Jolly, A.D. Insights into fluid transport mechanisms at White Island from analysis of coupled very long-period (VLP), long-period (LP) and high-frequency (HF) earthquakes / A.D. Jolly, I. Lokmer, J. Thun, J. Salichon, B. Fry, L. Chardot // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2017. 343. P. 75–94.
6. Neuberg J. The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat / J. Neuberg, H. Tuffen, L. Collier, D. Green, T.W. Powell, D. Dingwell // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2006. 153. P. 37–50, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2005.08.008.
7. Powell T.W. J. Time dependent features in tremor spectra / T.W. Powell, J. Neuberg // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2003. 128. P. 177–185, DOI: 10.1016/S0377-0273(03)00253-1.

Groundwater Pressure Changes Due to Magmatic Activation: Case Study of The E-1 Well, Kamchatka Peninsula, Russia

Galina Kopylova¹, Svetlana Boldina²

Kamchatka branch of the Geophysical Survey of the RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

¹gala@emsd.ru, ²boldina@emsd.ru

According to level measurements in the E-1 well, an increase in groundwater pressure over 3-4 years was detected, preceding the eruptions of Avachinsky volcano in 1991 and Koryaksky volcano in 2009. Characteristics of groundwater pressure increases and estimates of volumetric compressive stresses of water-bearing rocks are given for the well area. A steady increase in water level has been developing since June 2018. The possibility of using this phenomenon to predict the activation of the Avachinsky volcano is considered.

Keywords: well, pressure, volcano, eruption, eruption forecast

Изменения давления подземных вод при магматической активизации: на примере скважины Е-1, полуостров Камчатка, Россия

Г.Н. Копылова, С.В. Болдина

Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Петропавловск-Камчатский, 683006, Россия

По данным уровневых наблюдений в скважине Е-1 обнаружены повышения давления подземных вод в течение 3-4 лет, предшествующие извержениям вулкана Авачинский в 1991 г. и вулкана Корякский в 2009 г. Приводятся характеристики трендов роста давления подземной воды и оценки величин объемной деформации сжатия водовмещающих пород в районе скважины. Устойчивое повышение уровня воды развивается с июня 2018 г. Рассматривается возможность использования такого признака для прогнозирования активизации вулкана Авачинский.

Ключевые слова: скважина, давление, вулкан, извержение, прогноз извержения

В состав Авачинской группы вулканов входят два действующих вулкана – влк. Авачинский и влк. Корякский, расположенные на расстояниях 25 и 35 км к северу от столицы Камчатского края – г. Петропавловска-Камчатского. Последними их активизациями были извержение влк. Авачинский в январе 1991 г. и извержение влк. Корякский в конце декабря 2008 – в первой половине 2009 гг. (Селиверстов, 2009). Последнее извержение предварялось роем землетрясений с $K_s = 3-8$, который начался в марте 2008 г. и развивался в пределах субмеридиональной зоны, включающей постройку вулкана. В 12 км к ЮЗ от влк. Корякский и в 20 км к З от влк. Авачинский находится скважина Е-1, в которой КФ ФИЦ ЕГС РАН проводит наблюдения за уровнем воды в целях поиска гидрогеодинамических предвестников землетрясений Камчатской зоны субдукции (Копылова, 2001; Копылова, Болдина, 2012). Описание двух типов предвестников землетрясений в изменениях уровня воды и его суточной скорости (ГП_I и ГП_II) приводятся в (Копылова, Болдина, 2019). В указанной работе и на рис. 1 представлены примеры их проявления и использования для сейсмического прогнозирования в 2016–2019 гг.

В настоящей работе рассматриваются выделенные в изменениях уровня тренды повышения давления подземной воды, которые развивались в течение 3-4 лет и предшествовали и сопровождали активизации вулканов Авачинский и Корякский. Такие тренды рассматриваются в качестве показателей образования и развития тектономагматических источников роста давления подземных вод в недрах Авачинской вулканотектонической депрессии и предвестников вулканических извержений. В табл. 1 приводятся характеристики трендов роста давления подземной воды и величины объемной деформации сжатия водовмещающих пород в районе скв. Е-1, предшествовавшие двум извержениям вулканов Авачинской группы. Оценка величин объемной деформации

водовмещающих пород $\Delta\varepsilon$ проводилась по формуле $\Delta\varepsilon = \Delta h/A_v$, где Δh – амплитуда повышения уровня воды, см; $A_v = 0,015 \text{ см}/10^{-9}$ – величина деформометрической чувствительности уровня воды в скв. Е-1 по отношению к объемной деформации (Копылова, Болдина, 2012).

Таблица 1. Параметры трендов повышения давления подземной воды по данным наблюдений в скважине Е-1 в связи с извержениями вулканов Авачинской группы

| Время развития тренда повышения уровня; годы, месяцы (сутки) | Амплитуда повышения уровня, м / средняя скорость повышения, см/сут | Амплитуда роста давления подземной воды, бар | Объемная деформация сжатия водовмещающих пород $\Delta\varepsilon$, 10^{-6} / скорость, сут^{-1} |
|--|--|--|--|
| Эксплозивно-эффузивное извержение влк. Авачинский 12-26 января 1991 г. | | | |
| янв. 1987 – янв. 1991 гг., 3 года 1 мес. (≥ 1125 сут.) | $\geq 0,45/0,04$ | $\geq 0,045$ | $\geq 3,0 / 2,7 \times 10^{-9}$ |
| Гидротермально-магматическое извержение влк. Корякский в декабре 2008 – 2009 гг. | | | |
| июнь 2006 – дек. 2009 гг., 3 года 6 мес. (1260 сут.) | 1,22/ 0,10 | 0,122 | 8,1 / $6,4 \times 10^{-9}$ |

Точное начало развития тренда повышения уровня воды перед извержением влк. Авачинский в 1991 г. не известно, т. к. данные наблюдений на скважине имеются с января 1987 г. Поэтому приведенные в табл. 1 параметры времени развития тренда, его амплитуды и амплитуды повышения давления, а также величины объемной деформации сжатия водовмещающих пород, следует рассматривать в качестве минимальных оценок. В случае извержения влк. Корякский, параметры тренда повышения уровня воды, оценки роста давления и величины объемного сжатия водовмещающих пород являются более надежными. Отметим также, что величина деформации объемного сжатия водовмещающих пород $\Delta\varepsilon = 8,1 \times 10^{-6}$ (табл. 1) находится в удовлетворительном соответствии с расчетными величинами $\Delta\varepsilon = (4,1-15) \times 10^{-6}$ по модели квазистатических изолированных условий при возникновении источника объемного сжатия с использованием данных по упругим свойствам водовмещающих пород, вскрытых скважиной Е-1 (Копылова, Болдина, 2012). Дополнительными признаками приближающейся вулканической активизации в виде усиления локальной сейсмичности и извержения также являются увеличение скорости восходящего тренда уровня воды до 0,15-0,20 см/сут и ослабление чувствительности скважины к процессам подготовки сильных ($M_w \geq 5,0$) субдукционных землетрясений в радиусе до 350 км.

На рис. 1 представлены изменения уровня воды в скв. Е-1 в 2016-2019 г. и их прогностическая интерпретация. Устойчивое повышение уровня началось в июне 2018 г. На начало февраля 2020 г. продолжительность повышения уровня составила 1 год 8 мес. (600 сут.). Амплитуда повышения 42 см водяного столба эквивалентна росту давления на 0,042 бар. Средняя скорость повышения уровня составляла 0,06 см/сут. Величина деформации объемного сжатия водовмещающих пород достигла $2,8 \times 10^{-6}$ при средней скорости $4,7 \times 10^{-9} \text{ сут}^{-1}$. Повышенные величины скорости восходящего тренда уровня воды ($\geq 0,2$ см/сут) наблюдались в ноябре 2019 г. (рис. 1Б). Признаки ослабления чувствительности скважины к процессам подготовки сильных субдукционных землетрясений не обнаружены.

Обсуждение и результаты

По данным многолетних уровнемерных наблюдений в скважине Е-1 представлен новый способ слежения за состоянием действующих вулканов Авачинской группы. В качестве признака (предвестника) вулканических активизаций в виде извержений, усиления локальной сейсмичности и фумарольной деятельности рассматривается длительный рост давления подземной вод с повышенной скоростью в течение первых лет. По данным текущих уровнемерных наблюдений и их интерпретации в рамках модели статически изолированного отклика уровня воды на возникновение источника объемного сжатия водовмещающих пород, в ноябре 2019 г. было сделано заключение об активизации магматических очагов в районе Авачинской группы и возможном извержении.

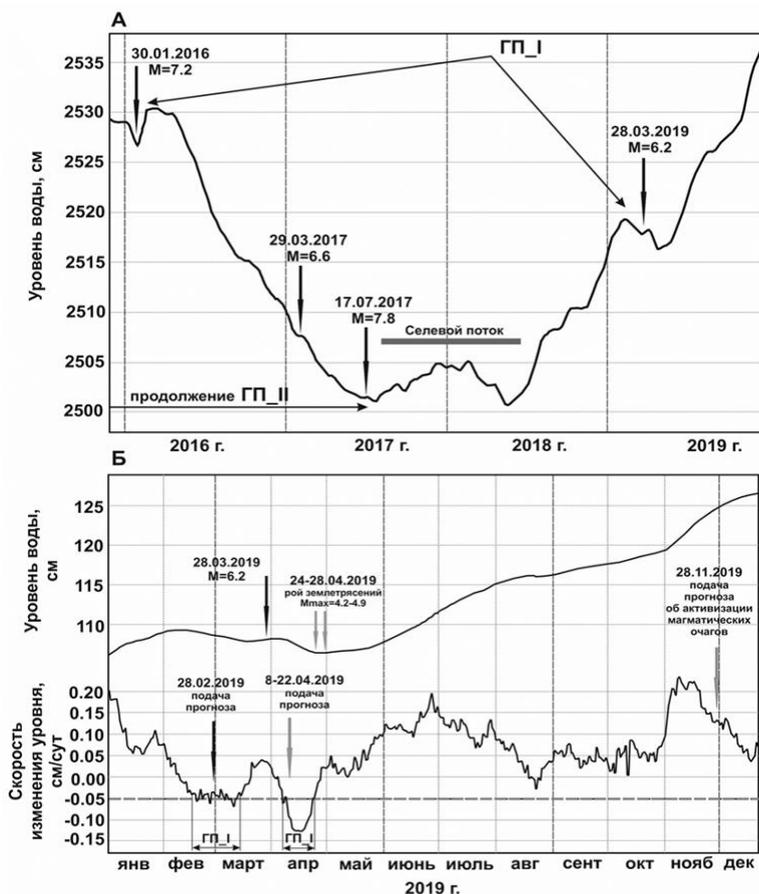


Рисунок 1 – Изменения уровня воды в скважине E-1: А – в 2016–2019 гг. с примерами проявления гидрогеодинамических предвестников землетрясений ГП_I и ГП_II, повышения уровня при нагрузке от селевого потока 24.07.2018 г. и возможного возникновения магматического источника в районе Авачинской группы вулканов (июнь 2018 – декабрь 2019 гг.); стрелками показаны сильные землетрясения, в т. ч. события 30.01.2016 г. и 28.03.2019 г., которые были спрогнозированы в реальном времени; Б – изменения уровня и его суточной скорости в 2019 г.: стрелками над верхним графиком показаны землетрясения, стрелками над нижним графиком – даты подачи прогнозов в экспертные советы по прогнозу землетрясений, действующие в Камчатском крае; горизонтальная пунктирная линия – пороговое значение суточной скорости для выделения ГП_I

В последние годы влк. Корякский не проявлял повышенной активности. На влк. Авачинский продолжалась фумарольная деятельность в районе кратера и проявлялась слабая приповерхностная сейсмичность. В течение 2012–2016 гг. температура Западной фумаролы повышалась с 370 до 819 °С; при этом температурный режим и химический состав других фумарол в области кратера существенно не изменялись (Малик и др., 2017). По данным КФ ФИЦ ЕГС РАН (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>) в течение ноября 2019 – февраля 2020 гг. влк. Авачинский проявлял повышенную активность в усилении сейсмичности в районе конуса и свечения в западной части кратера. С учетом текущих данных КФ ФИЦ ЕГС РАН о развитии сейсмичности и фумарольной деятельности можно предполагать, что наиболее вероятным кандидатом на извержение в течение ближайших месяцев – первых лет является влк. Авачинский.

Продолжение наблюдений за повышением уровня воды в скважине E-1 с использованием дополнительных прогностических признаков – увеличения скорости повышения уровня воды и ослабления чувствительности скважины к процессам подготовки сильных землетрясений, возможно, позволит уточнить время извержения влк. Авачинский.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-00337).

Список литературы

1. Копылова Г.Н. Изменения уровня воды в скважине Елизовская-1, Камчатка, вызванные сильными землетрясениями (по данным наблюдений в 1987-1998 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2001. №2. С. 39–52, URL: <https://www.researchgate.net/publication/315746670> (Дата обращения 02.03.2020).
2. Копылова Г.Н. О связи изменений уровня воды в скважине E-1, Камчатка, с активизацией вулкана Корякский в 2008–2009 гг. и сильными ($M \geq 5$) землетрясениями / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина // Вулканология и сейсмология/ 2012. №5. С. 41–54,

DOI: 10.1134/S074204631205003X, URL: <https://researchgate.net/publication/327634495>
(Дата обращения 08.08.2020).

3. Копылова Г.Н. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. / Г.Н. Копылова, С.В. Болдина // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20, DOI: 10.31857/S0205-9614201923-20, URL: <https://researchgate.net/publication/332552757>
(Дата обращения 08.08.2020).

4. Малик Н.А. Температура и состав фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013–2016 гг. / Н.А. Малик, М.Е. Зеленский, В.М. Округин // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 1. Вып. 33. С. 21–33, URL: <http://kscnet.ru/journal/kraesc/article/view/115/pdf> (Дата обращения 02.03.2020).

5. Селиверстов Н.И. Активизация вулкана Корякский на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 7–9, URL: <http://kscnet.ru/journal/kraesc/article/view/513/pdf> (Дата обращения 02.03.2020).

УДК 550.341.5

Remote monitoring of the dynamics of the flow of magmatic gas into the geothermal reservoir based on the HOBO RX 3000 station

Andrey Yu. Polyakov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
pol@kscnet.ru*

The change in the content of non-condensed gas (NGG) at the turbine generator of a geothermal power plant reflects the average characteristics of the change in the inflow of magmatic gases into the productive geothermal reservoir as a whole. The result of a 30-day operation of the system is the measurement of changes in the averaged total content of the NGG at the GeoPP turbogenerator, which characterizes both the connection / disconnection of production wells and changes in the influx of magmatic gases into the productive geothermal reservoir as a whole.

Keywords: NGG, remote monitoring, magmatic gas, geothermal reservoir, volcano

Удаленный мониторинг динамики поступления магматического газа в геотермальный резервуар на базе станции HOBO RX 3000

А.Ю. Поляков

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Изменение содержания неконденсированного газа (НКГ) на турбогенераторе геотермальной электростанции отражает усредненные характеристики изменения притока магматических газов в продуктивный геотермальный резервуар в целом. Результатом 30 дневной работы системы являются измерения изменений усредненного суммарного содержания НКГ на турбогенераторе ГеоЭС, что характеризует как подключения/отключения добычных скважин, так и изменения притока магматических газов в продуктивный геотермальный резервуар в целом.

Ключевые слова: НКГ, удаленный мониторинг, магматический газ, геотермальный резервуар, вулкан

Введение

Возможность непрерывных измерений содержания неконденсированного газа (НКГ) на турбогенераторе геотермальной электростанции позволяет отследить усредненные характеристики изменения притока магматических газов в продуктивный геотермальный

резервуар. В этом случае, при условии постоянного доступа к данным посредством сети интернет, вероятен прогноз активности Мутновского вулкана и сильных землетрясений. Работа является продолжением исследований опубликованных в (Кириухин и др., 2002, Кириухин и др., 2006).

Удаленный мониторинг

Система дистанционного мониторинга создана на базе станции HOBO RX 3000 (3), производства Onset Computer Corporation (США) <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/rx3000> (Рис. 1). В состав системы, для контроля параметров окружающей среды входят: датчик атмосферного давления (1) (S-BPB-CM50), датчик влажности и температуры (2) (S-TNB-M008) производства Onset Computer Corporation.

Для измерения парциального НКГ (большая часть газосодержания – CO₂) в конденсаторе турбины геотермальной электростанции были использованы датчик давления (4) производства Beijing HUXC Technology (КНР), диапазон измерений –1-0 бар, точность измерения ±0,5 % и датчик температуры (5) производства той же фирмы, диапазон измерений –40 ~ 110 °С точность измерения ±0,5 %, резьбовое соединение G1/2.

Программная web платформа HOVOLink (Рис. 2) используется для доступа к текущим и сохраненным данным, через интернет посредством GSM/3G связи.

Результаты

Тестирование системы дистанционного мониторинга осуществлялось в течение 30 дней. Для оценки парциального P_{CO2} были проведены одновременные измерения давления конденсата пара P_c и его температуры T_c; затем P_{CO2} рассчитывали как разницу между P_c и давлением насыщения водяного пара, соответствующими температуре T_c, зависимость была определена аппроксимацией табличных данных.

На (Рис. 3) показано временное изменение P_{CO2} в течение периода наблюдений с 23.08.2019 по 25.09.2019. Хорошо видно, что по меньшей мере 14 максимумов P_{CO2} синхронизированы с 14 минимумами T_c, которые демонстрируют поступление неконденсируемого газа в турбину из эксплуатационного геотермального резервуара. Некоторые из этих пиков P_{CO2} могут быть связаны с импульсами разгрузки магматического газа, описанные в (Kiryukhin et al, 2020).



Рисунок 1 – Система дистанционного мониторинга на базе станции HOBO RX 3000:
1- датчик атмосферного давления, 2- датчик влажности и температуры, 3- HOBO RX 3000, 4- датчик давления, 5- датчик температуры, 6, 7 – сетевые блоки питания

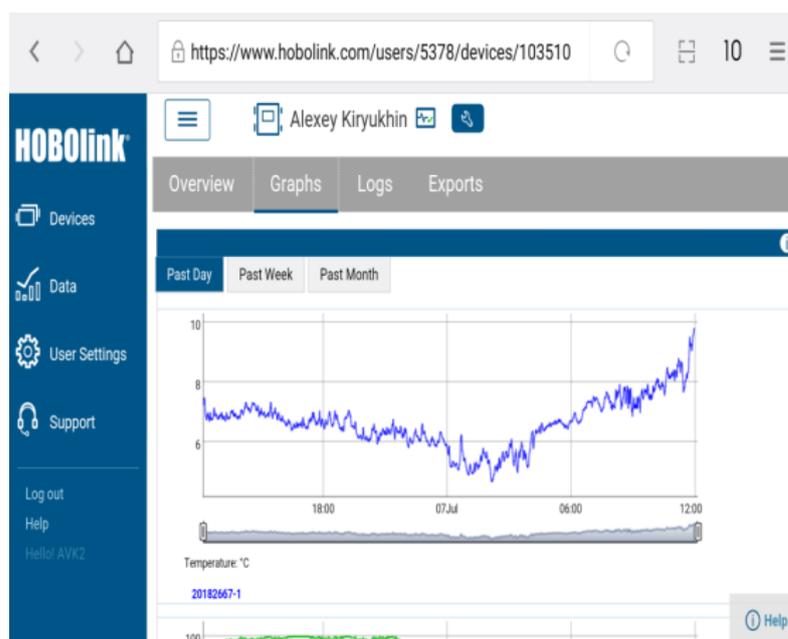


Рисунок 2 – HOBOLink, графическая интерпретация текущих данных

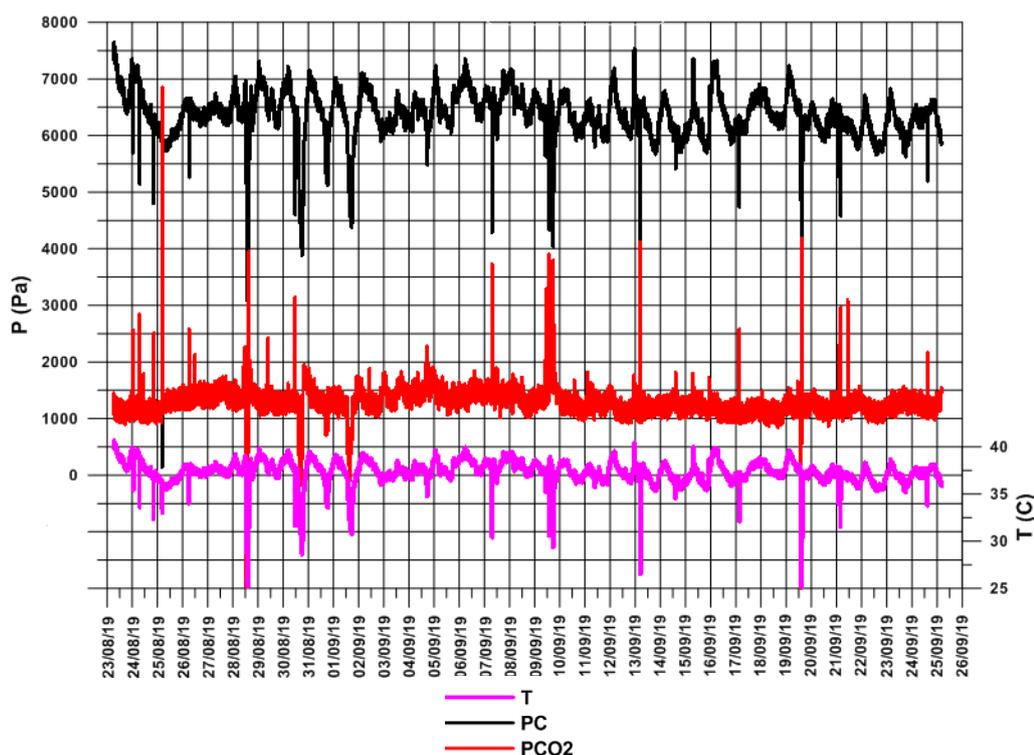


Рисунок 3 – Расчетное парциальное давление CO_2 в конденсаторе на выходе из турбины геотермальной электростанции., PCO_2 – парциального давления НКГ в конденсаторе турбины геотермальной электростанции, PC – давление конденсата пара, T - температура конденсата пара

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 (Kiryukhin et al, 2018).

Значения $\delta^{13}C$ (CO_2) в скважинах 022, 031, 035, A4 и R27 термопроявлениях Медвежье и Верхне-Мутновские, Мутновского геотермального месторождения варьируются в диапазоне от $-8,4$ до $-5,6$ ‰, что свидетельствует о магматическом происхождение CO_2 (Kiryukhin et al, 2018).

Исследование гипоцентрального поля землетрясений на основе анализа плоско-ориентированных кластеров (Кирюхин и др., 2018) 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.

Выводы

Результаты тестовой работы системы показали изменения усредненного суммарного содержания НКГ на турбогенераторе ГеоЭС, что характеризует как подключения/отключения добычных скважин, так и изменения притока магматических газов в продуктивный геотермальный резервуар в целом (именно эта информация необходима для прогноза активности Мутновского вулкана и сильных землетрясений).

Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 18-05-00052. Автор выражает благодарность Кирюхину А.В. за постановку задачи и консультации.

Список литературы

1. *Kiryukhin A. Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations / A. Kiryukhin, E. Chernykh, A. Polyakov et al. // Geosciences. 2020. 10, 52. P. 1–16, DOI: 10.3390/geosciences10020052.*
2. *Kiryukhin A.V. Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) / A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, O.O. Usacheva et al. // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2018. P. 36–55.*
3. *Кирюхин А.В. Геомеханическая интерпретация сейсмичности на шельфе Камчатки: приложения для сейсмического прогноза и поиска углеводородов / А.В. Кирюхин, С.А. Федотов, А.В. Соломатин и др. // 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.*
4. *Кирюхин А.В. Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью / А.В. Кирюхин, М.Д. Лесных, А.Ю. Поляков // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 51–60.*
5. *Кирюхин А.В. О возможной связи сильных землетрясений с аномальными изменениями давления в двухфазном геотермальном резервуаре / А.В. Кирюхин, В.А. Корнеев, А.Ю. Поляков // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 3–11.*

TOUGH-2 modeling thermal-hydrodynamic conditions of the Avachinsky volcano cone

Evgenia V. Chernykh

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
jenia.chev@yandex.ru*

The paper analyzes the radial-cylindrical model of the Avachinsky volcano cone, the height of the model cone is 950 m abs., The base radius is 2 km. The model specifies the reservoir properties (reservoir properties) and thermophysical properties (TPP) of the host rocks. The aim of this work is to build a model and analyze seismic activity for the period from 2000 to 2020, which could lead to the heating of the volcano's cone.

As a result of modeling, there was a weak heating of the cone with a rock temperature at the outlet of the crater of 126 °C and a pressure of 6×10^4 Pa. Considering the thickness of the lava plug, 8366300 m³, it is obvious that this heating is not enough for its rupture and destruction of the cone.

Keywords: model, TOUGH-2, PetraSim modeling, seismicity, heat source, seismogenic sites

TOUGH2 моделирование термогидродинамического состояния конуса Авачинского вулкана

Е.В. Черных

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

В работе проанализирована радиально-цилиндрическая модель конуса Авачинского вулкана, высота модельного конуса равна 950 м. абс., радиус основания 2 км. В модели заданы фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) и теплофизические свойства (ТФЗ) вмещающих пород. Целью данной работы является построение модели и анализ сейсмической активности за период с 2000 по 2020 гг., которая могла привести к разогреву конуса вулкана.

В результате моделирования произошел слабый прогрев конуса с температурой пород на выходе из кратера 126 °C и давлением $6 \cdot 10^4$ Па. Учитывая мощность лавовой пробки 8366300 м³ очевидно, что для ее разрыва и разрушения конуса этого прогрева недостаточно.

Ключевые слова: модель, TOUGH-2 моделирование, программа PetraSim, сейсмичность, тепловой источник, сейсмогенные площадки

Введение

Авачинский вулкан высотой 2750 м. абс. относится к числу активных вулканов Камчатки. За период с 1739 по 2020 гг. известно и документально подтверждено 15 извержений, которые отличались различной силой, интенсивностью и длительностью (Мелекесцев и др. 2002).

Активная деятельность Авачинского вулкана с октября 1937 г. по декабрь 1938 г., проявилась тремя пароксизмальными извержениями, представляющими собой кратковременные серии гигантских выбросов магматического газа, богатого пеплом и бомбами. Вероятно, вслед за каждым выбросом газа, кратер наполнялся раскаленной массой шлаков и вулканического песка. Эта масса переливалась через край кратера на склоны, тем самым провоцируя мощные катастрофические лавины протяженностью до 18 км в Ю-ЮВ направлении вниз по Сухой речке Халактырская. (Пийп, 1941). В 1945 г. извержение было чисто эксплозивным, исключительно сильным и очень коротким (продолжалось менее 7 часов). В ходе извержения часть пирокластических потоков сформировала склоны молодого конуса вулкана с кратером диаметром ≈ 250 м и глубиной ≈ 170 м. На северо-восточном склоне потоки достигали подножия конуса, на западном – они доходили до середины склона, а на южном склоне поток был самым протяженным и спустился в верховья

долины р. Сухая Халактырская, в результате чего ее дно было прорезано на глубину 2-3 метра потоком талых вод (Мелекесцев и др., 1994). Извержение, произошедшее спустя 46 лет (в январе 1991 г.) было эксплозивным, с изливом лавы на Юг – Юго-Восточный склон вулкана и образованием пробки в кратере. Объем пробки оценен в 8366300 м³ (Мелекесцев и др., 1994). Последующее извержение Авачинского вулкана произошло в 2001 г. По мнению (Мелекесцев и др., 2002) оно представляло собой слабую газовую эксплозию, в результате которой образовалась трещина, расщепившая лавовую пробку в направлении СЗ-ЮВ.

Для анализа термогидродинамического состояния конуса Авачинского вулкана в связи с прогнозом фреато-магматической активности используется TOUGH2-моделирование.

По сейсмическим данным за период наблюдений с 2000 по 2020 гг. (по данным Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН) Авачинский вулкан осуществляет инъекцию магмы в большей части случаев в интервале а. о. 500–2000 м и в радиусе 2 км (Кiryukhin и др., 2017, Черных, 2018, Kiryukhin et al, 2017, Kiryukhin et al, 2020).

Термогидродинамическая модель конуса Авачинского вулкана

Для сборки модели использован графический интерфейс PetraSim 5.2. В качестве модуля состояния использован EOS3 (вода+воздух+газ), так как конус находится выше уровня подземных вод и поэтому в породах его порового пространства содержится вода, водяные пар, в газовой фазе воздух. Наличие значительной объемной доли воздуха 87,28 об.% в разгрузках фумаролы подтверждается табл. 1.

Таблица 1. Химический состав газов, отобранных из фумаролы FA

| Дата отбора | CH ₄ | CO | CO ₂ | He | H ₂ | O ₂ | N ₂ |
|-------------|-----------------|--------|-----------------|------|----------------|----------------|----------------|
| 03.08.2017 | 0,013 | 0,0034 | 12,62 | н.о. | 0,011 | 17,26 | 69,55 |
| 28.07.2018 | 0,096 | | 9,99 | 0 | 0,04 | 18,81 | 70,18 |

Примечание: (Пробы отбирались Кiryukhin А.В., Ворониным П.О., Журавлевым Н.Б., Рычковой Т.В., Черных Е.В. по методике (Кiryukhin А.В. Поляков А.Ю., 2019), ПХА проведен в аналитическом центре ИВиС ДВО РАН)

Геометрия модели определена в виде конуса высотой 950 м с радиусом основания 2 км.

Вычислительная сетка. Радиально-цилиндрическая сетка задана с параметрами Nx = 20 м и Nz = 10 м количеством элементов в модели 4720.

Материальные свойства. В модели определены 2 домена с различными материальными свойствами: водоупор CAPRC и резервуар RESER. Фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) и теплофизические свойства (ТФЗС) пород, заданные на модели характеризуются следующими величинами: минеральная плотность горных пород 2600 кг/м³, пористость 0,1, проницаемость 1 Д, теплопроводность 2 Вт/м·°С, удельная теплоемкость 1000 Дж/кг·°С, линейная функция относительной проницаемости (0,0; 1,0; 0,0; 1,0).

Для домена CAPRC задана слабопроницаемая пористость 0,01.

Граничные условия. Разгрузка задается на вершине конуса с помощью опции «well on deliverability» (Pb = 0,6 bar, PI = 1 × 10⁻⁷ м³). На боковой поверхности конуса определяются условия «fixed state» (2-Phase: Pg = 0,7 bar; Sg = 0,5; T = 10 °С).

Начальные условия. В качестве первого приближения на модели заданы начальные условия: 2-Phase: Pg = 50 bar; Sg = 0,5; T = 25 °С.

Тепловые источники. Тепловыделение источников Q определялось по суммарному объему V инъекций магмы (дайки и силлы, определяемые по сейсмическим данным) за соответствующий интервал времени, с использованием формулы (1), предложенной (Fujii et al., 2017):

$$M = 0,67 \cdot \log(V) - 0,82 \quad (1)$$

где V – объем магмы (м³) формула (2):

$$V = 10^{\left(\frac{M+0,82}{0,67}\right)} \quad (2)$$

где M – максимальная магнитуда индуцированного сейсмического события. На рис. 1 показан график накопления магмы в конусе Авачинского вулкана за период 2007–2020 гг.

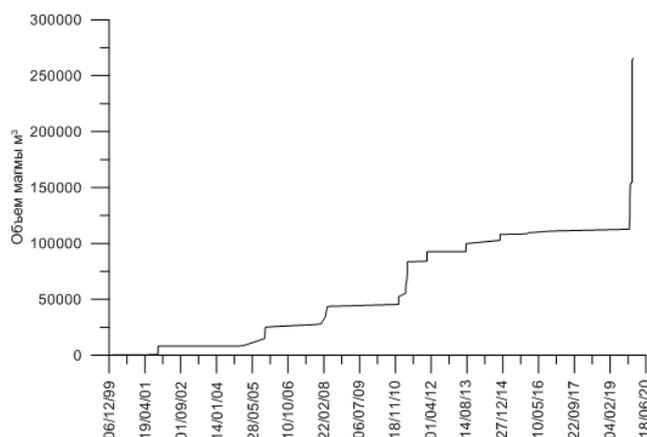


Рисунок 1 – График накопления магмы в конусе Авачинского вулкана в период 2007–2019 гг. Цифры соответствуют порядковым номерам инъекций магмы

Тепловая энергия источников Q определяется по формуле (3)

$$Q = V \times \rho \times C \times T \quad (3)$$

где ρ – плотность магмы $2800 \text{ (кг/м}^3\text{)}$; C – удельная теплоёмкость пород $1000 \text{ (Дж/кг } ^\circ\text{C)}$; T – температура $1200 \text{ (}^\circ\text{C)}$.

Из графика рис. 1 и формулы (3) можно получить значения тепловой мощности источников в конусе вулкана за различные интервалы времени. Для интервала времени 2000–2020 гг. – $1,41 \text{ МВт}$, для интервала времени ноябрь–декабрь 2019 гг. – 109 МВт (за 55 дней).

На модели мощность тепловых источников задавалась в широком диапазоне с целью выяснения условий фреато-магматического взрыва конуса Авачинского вулкана.

Параметры моделирования. Время моделирования $9,46 \cdot 10^7$ сек (3 года).

Результаты моделирования

Через 3 года моделирования, когда состояние системы установилось, произошел слабый прогрев конуса с температурой пород на выходе из кратера $126 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2) и давлением $6 \cdot 10^4 \text{ Па}$ (рис. 3). Учитывая объем лавовой пробки 8366300 м^3 очевидно, что для ее разрыва и разрушения конуса этого прогрева недостаточно.

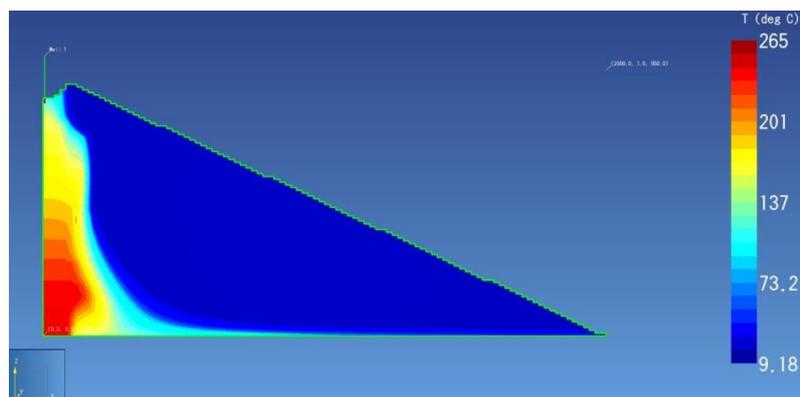


Рисунок 2 – Распределение потоков тепла в модели конуса Авачинского вулкана по результатам моделирования

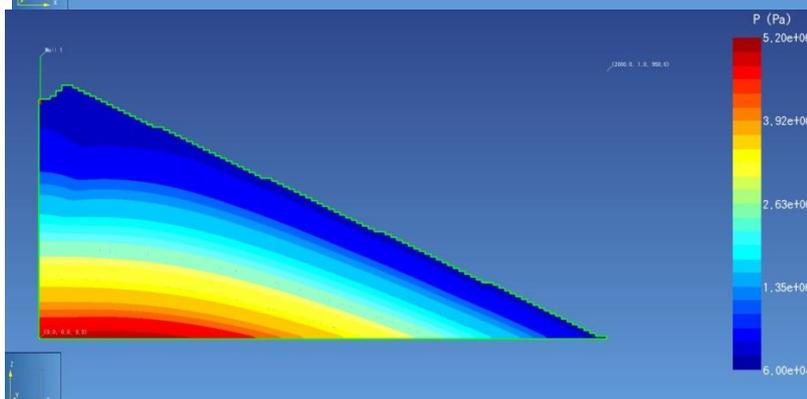


Рисунок 3 – Распределение давления в модели конуса Авачинского вулкана по результатам моделирования

Выводы, задачи дальнейших исследований

Задачей для дальнейших исследований является использование этой же модели для выяснения, при какой тепловой мощности инъекций магмы мы получим условия для потенциального гидротермального взрыва.

Работа выполнялась в рамках государственного задания АААА-А17-117050210046-7 и при поддержке РФФИ по проекту 18-05-00052.

Автор выражает благодарность Кирюхину А.В. за постановку задачи и консультации.

Список литературы

1. Мелекесцев И.В. Информационное сообщение об активизации в октябре 2001 г. / И.В. Мелекесцев, Н.И. Селиверстов, С.Л. Сеньюков // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 79–80.
2. Пийп Б.И. Извержение вулкана Авача в 1938 г. // Бюллетень вулканологической станции на Камчатке. 1941. № 10. С. 12–22.
3. Мелекесцев И.В. Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа параметров бедующих извержений) Ч.II (1926–1991 гг.) / И.В. Мелекесцев, О.А. Брайцева, В.Н. Двигало и др. // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 3–23.
4. Кирюхин А.В. Магматические питающие системы Корякско–Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников / А. В. Кирюхин, С.А. Федотов, П.А. Кирюхин, Е.В. Черных // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3–17.
5. Черных Е.В. Анализ инъекции магмы в Корякско-Авачинской группе вулканов в 2016–2017 гг. // Материалы XXI региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск – Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. С. 149–152.
6. Кирюхин А.В. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008–2012 гг. / А. В. Кирюхин, С. А. Федотов, П. А. Кирюхин // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3–20.
7. Kiryukhin A. Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia) / A. Kiryukhin, V. Lavrushin, P. Kiryukhin, P. Voronin // Geofluids. 2017. Vol. 2017, Article ID4279652. p. 21, DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/4279652>.
8. Kiryukhin A. Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations / A. Kiryukhin, E. Chernykh, A. Polyakov, A. Solomatin // *Geoscience*. 2020. 10. P. 52, DOI: 10.3390/geosciences10020052.
9. Поляков А.Ю., Кирюхин А.В. Устройство для отбора конденсата воды из фумарол (выдан патент № 0195671 (RU 0195671 U1)).
10. Fujii Y. Upper Bounds of Seismic Events in Induced Seismicity by Shale Gas Extraction, Carbon Capture and Storage, and Natural Magma Injection / Y. Fujii, J. Kodama, D. Fukuda // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2017. № 6. P. 25.

Isotopic composition of fluid phase of the mud volcanoes (the Kerch Peninsula, Eastern Crimea)

Elena P. Kayukova

*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
epkayu@gmail.com*

The article focuses on study of the isotopic composition of the fluid phase of the mud volcanoes of the northeastern part of the Kerch Peninsula (Eastern Crimea). The Kerch peninsula is a part of the Kerch-Taman mud volcano province of the Pacific belt. It is a region of active tectonic processes. Two mud volcano fields are known in the north of the Kerch peninsula: Bulganak and Tarkhan. Isotopic investigations were conducted to determine the genesis of brine of mud volcanoes. The Kerch peninsula is the main hydromineral region of the Crimea; it contains vast deposits of curative mud, salt, mineral waters, small reserves of oil and gas.

Keywords: Eastern Crimea, fluid phase of the mud volcanoes, isotopic composition

Изотопный состав жидкой фазы грязевых вулканов (Керченский полуостров, Восточный Крым)

Е.П. Каюкова

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

В настоящей работе представлены изотопные данные сопочных вод северо-восточной части Керченского полуострова, где располагаются Булганакские и Тарханские грязевые сопки. Керченский полуостров является основным гидроминеральным районом Крыма; здесь содержатся обширные залежи лечебной грязи, соли, минеральных вод, небольшие запасы нефти и газа. Это область активных тектонических процессов. Керченский полуостров является частью Керченско-Таманской грязевулканической провинции, которая входит в состав альпийской складчатой области Средиземноморского (Альпийско-Гималайского) подвижного пояса.

Ключевые слова: Восточный Крым, грязевые вулканы, изотопный состав

Керченский полуостров – основной гидроминеральный район Крыма. При сравнительно небольшой площади (всего около 2830 км²) на полуострове располагаются обширные залежи лечебной грязи, соли, рассолов; имеются многочисленные минеральные источники, известны проявления термальных вод, небольшие запасы нефти и газа. Потенциал его природных лечебных и рекреационных ресурсов чрезвычайно высок за счет, в первую очередь, наличия на полуострове большого количества соляных озер и грязевых вулканов. В структурном отношении северо-восточная часть Керченского полуострова находится в границах компенсационного Индоло-Кубанского краевого прогиба Скифской эпигерцинской плиты (Гидрогеология..., 1970). Грязевой вулканизм характерная черта Керченского полуострова. Наиболее изучены грязевые сопки Булганакского сопочного поля, расположенного вблизи с. Бондаренково Ленинского района Крыма.

Сопочные воды северо-восточной части Керченского полуострова гидрокарбонатно-хлоридные натриевые или хлоридно-гидрокарбонатные натриевые. По классификации Сулина воды грязевых вулканов относятся к гидрокарбонатно – натриевому типу (рис. 1, 2). Минерализация сопочных вод, главным образом, в пределах 10-20 г/л, температура – около 19-20 °С.

|  | | № на карте | Формула Курлова | кол-во проб |
|---|--|------------|--|-------------|
| | | 1 | $M_{12,7} \frac{Cl(32-47)HCO_3(30-45)CO_3(22-23)}{Na(94-98)} pH 9$ | 2 |
| | | 2 | $M_{24} \frac{Cl40 HCO_3 39 CO_3 21}{Na99} pH 8.7$ | 1 |
| | | 3 | $M_{1120} \frac{Cl(33-49)HCO_3(25-47)}{Na(91-95)} pH 8.4$ | 2 |
| | | 4 | $M_{19} \frac{Cl49 HCO_3 36}{Na98} pH 8.5$ | 1 |
| | | 5 | $M_{14} \frac{Cl47 HCO_3 41}{Na96} pH 8.2$ | 1 |
| | | 6 | $M_{29} \frac{Cl54 HCO_3 31}{Na99} pH 8.5$ | 1 |
| | | 7 | $M_{1115} \frac{Cl(34-66)HCO_3(28-43)CO_3(10-27)}{Na(95-97)} pH 8.4$ | 4 |
| | | 8 | $M_{1417} \frac{Cl(54-68)HCO_3(32-36)}{Na(95-97)} pH 8.3$ | 2 |
| | | 9 | $M_{1116} \frac{Cl(51-67)HCO_3(26-48)}{Na(95-97)} pH 8$ | 3 |

Сопки:
 1. Андрусова (южный грифон); 2. Центральное озеро;
 3. Обручева; 4. Ольденбургского; 5. Вернадского;
 6. Конус Абиха; 7. Тищенко; 8. Трубецкого; 9. Шилова

Рисунок 1 – Расположение и химический состав жидкой фазы грязевых сопок

Относительные содержания стабильных изотопов сопочных вод Булганакского и Мало-Тарханского полей варьируют в пределах от 2,6 до 11,4‰ для $\delta^{18}O$ и от -29,1 до 20,0‰ для δD . Изучение изотопного состава воды (δD и $\delta^{18}O$) проводилось в Ресурсном центре СПбГУ «Геомодель». Пробы анализировались на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro (США).

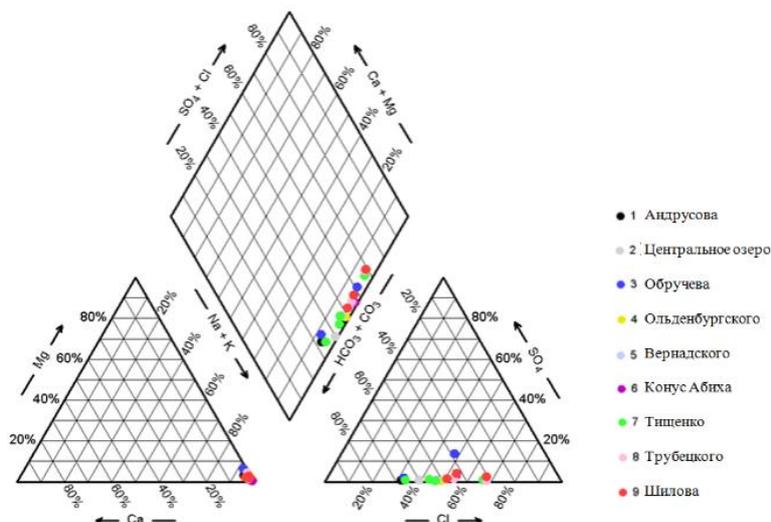


Рисунок 2 – Химический состав жидкой фазы грязевых сопок на диаграмме Пайпера

В последние годы появилось достаточно много опубликованных данных изотопного состава жидкой фазы грязевых вулканов (Ершов и Левин, 2016; Каюкова и Юровский, 2019; Лаврушин и др., 2005; Киквадзе, 2016 и др.). На рисунке 3 показана взаимосвязь между изотопами водорода и кислорода для жидкой фазы грязевых вулканов Керченско-Таманской области. Все фигуративные точки смещены в правую область от глобальной линии метеорных вод (GMWL) и расположились вдоль линии, имеющей тренд $\delta D = 0,85 \delta^{18}O - 31,04$; точки, отвечающие изотопному составу сопочных вод северо-восточной части Керченского полуострова расположились вдоль линии, имеющей тренд $\delta D = 0,73 \delta^{18}O - 30,57$ ($R^2 = 0,7$). Сведения об изотопном составе (δD и $\delta^{18}O$) жидкой фазы грязевых вулканов Таманской области получены из опубликованных источников (Лаврушин и др., 2005; Киквадзе, 2016).

Таблица 1. Изотопный состав жидкой фазы грязевых сопок Восточного Крыма

| Дата отбора | Объект | $\delta^{18}\text{O}$, ‰ | $\delta^2\text{H}$, ‰ |
|-------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------|
| 13.07.16 | сопка Павлова | 5,1 | -31,0 |
| 03.08.12 | Андрусова, СВ грифон | 11,2 | -20,0 |
| 11.07.17 | Андрусова, южн. склон | 11,8 | -18,7 |
| 13.07.17 | оз. Центральное | 10,3 | -20,5 |
| 04.07.17 | Центральное, вост. часть | 11,7 | -15,2 |
| 04.07.17 | Центральное, северная часть | 12,0 | -15,1 |
| 13.07.16 | Обручева, осн. жерло | 9,9 | -23,0 |
| 24.06.18 | Обручева, осн. жерло | 11,8 | -23,0 |
| 11.07.17 | Обручева, осн. жерло | 7,3 | -24,5 |
| 24.06.18 | Обручева, ист. под горой из трубы | 12,6 | -21,4 |
| 11.07.17 | Обручева, ист. под горой из трубы | 10,8 | -25,4 |
| 11.07.17 | Обручева, грифоны вост. части | 10,9 | -24,0 |
| 11.07.17 | Обручева, выходы на дне оврага | 10,0 | -18,4 |
| 11.07.17 | Ольденбургского | 8,6 | -5,5 |
| 03.08.12 | Вернадского | 11,2 | -24,0 |
| 11.07.17 | Вернадского | 11,7 | -20,6 |
| 03.08.12 | Конус Абиха | 11,4 | -23,0 |
| 11.07.17 | Конус Абиха | 5,7 | -27,2 |
| 25.06.14 | Тищенко осн. жерло (отбор ЕП) | 2,8 | -27,5 |
| 25.06.14 | Тищенко, осн. жерло (отбор студ.) | 8,6 | -24,1 |
| 24.06.15 | Тищенко, осн жерло 1 | 9,2 | -24,0 |
| 13.07.16 | Тищенко | 8,2 | -23,0 |
| 11.07.17 | Тищенко | 8,4 | -28,2 |
| 25.06.14 | Тищенко, СВ грифон | 2,6 | -29,1 |
| 11.07.17 | Тищенко, СВ грифон | 3,5 | -20,9 |
| 24.06.15 | сопка Трубецкого | 7,2 | -24,0 |
| 12.07.17 | сопка Трубецкого | 10,0 | -25,7 |
| 25.06.14 | Трубецкого, СЗ грифон | 9,9 | -21,1 |
| 25.06.14 | Трубецкого, грифон | 7,3 | -27,0 |
| 12.07.17 | Трубецкого, ЮВ сольза | 8,3 | -23,5 |
| 25.06.14 | Шилова, осн. жерло, широкое | 9,7 | -24,8 |
| 12.07.17 | Шилова, осн. жерло, широкое | 9,5 | -24,3 |
| 12.07.17 | Шилова, основное узкое жерло | 8,8 | -28,6 |
| 12.07.17 | Шилова, ЮВ грифон 1 | 10,2 | -24,6 |
| 12.07.17 | Шилова, ЮВ грифон 2 | 6,7 | -31,8 |
| 12.07.17 | Шилова, ЮВ грифон 3 | 9,4 | -26,3 |
| 12.07.17 | Шилова, западная группа | 8,3 | -27,5 |

Примечание: пробы выполнены в ресурсном Центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Санкт-Петербургского государственного университета

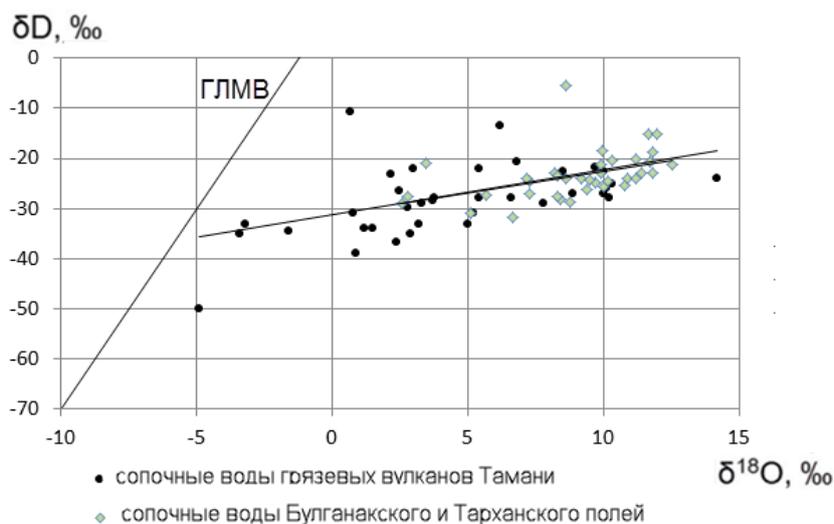


Рисунок 3 – Изотопный состав жидкой фазы грязевых сопок Керченско-Таманской грязевулканической области

Химический состав и соотношения δD и $\delta^{18}O$ сопочных вод грязевых сопок Таманского полуострова и сопок Булганакского и Тарханского полей имеют явное сходство. Этот факт указывает на родственный генезис и общие механизмы формирования. Вероятно, формирование ионно-солевого состава жидкой фазы выбросов грязевых вулканов Керченского полуострова связано с весьма глубоко залегающими отложениями (мезозойскими или даже палеозойскими).

Принимая во внимание близость моря и то, что сопочные воды содержат ряд полезных для здоровья человека компонентов (йод, буру, бром и другие) и лечебные сопочные грязи (Ежов и др., 2017; Васенко и Округин, 2016), вблизи Булганакского месторождения может быть построен прекрасный бальнеологический курорт, ресурсы которого (при разумной эксплуатации) будут практически неисчерпаемы.

Автор благодарит сотрудников Ресурсного центра Санкт-Петербургского государственного университета за реализацию изотопно-аналитических работ.

Список литературы

1. Васенко, В.И. Пелоиды грязевых вулканов Керченского полуострова / В.И. Васенко, В.М. Округин // II Межд. конгресс «Санаторно-курортное лечение». М., 2016. С. 109–110.
2. Гидрогеология СССР. Т.8. Крым / Под ред. В.Г. Ткачук М.: Недра, 1970. 351 с.
3. Ежов В.В., Васенко В.И., Гулов О.А. Бальнеологические характеристики крымской вулканической грязи Булганакского месторождения / В.В. Ежов, В.И. Васенко, О.А. Гулов // Медицина Кыргызстана. 2017. 3. С. 17–25.
4. Ершов В.В. Новые данные о вещественном составе продуктов деятельности грязевых вулканов Керченского полуострова / В.В. Ершов, Б.В. Левин // Доклады Академии наук. 2016. Т. 471, № 1. С. 82–86.
5. Каюкова Е.П. Химический и изотопный состав водопроявлений в районе озера Тобечик (Крым, Керченский полуостров) / Е.П. Каюкова, Ю.Г. Юровский // Труды Крымской Академии наук. Симферополь. 2019. С. 68–75.
6. Киквадзе О.Е. Геохимия грязевулканических флюидов Кавказского региона. Диссертация М.: Геологический институт РАН, 2016. 183 с.
7. Лаврушин В.Ю. Изотопный состав кислорода и водорода вод грязевых вулканов Тамани (Россия) и Кахетии (Восточная Грузия) / В.Ю. Лаврушин, Е.О. Дубинина, А.С. Авдеенко // Литология и полезные ископаемые. 2005. № 2. С. 143–158.

Geothermal and Water Energy – in the Economy of Kamchatka (RUSSIA)

Vladimir A. Semchev

*KGKU Regional Centre development energy Kamchatka, Petropavlovsk Kamchatka, Russia
semchev1943@yandex.ru*

The problematic issues of energy in the Kamchatka Territory are considered. Science is not in demand by the Kamchatka economy.

Keywords: economics, energy, water energy, heat energy of the Earth, science, ecology, subsidies, salmon

Геотермальная энергия и энергия воды – в экономике Камчатки

В.А. Семчев

*КГКУ «Региональный центр развития энергетики и энергосбережения»,
при Министерстве ЖКХ и энергетики Камчатского края, Петропавловск-Камчатский, Россия*

Рассматриваются проблемные вопросы энергетики в Камчатском крае. Наука – не востребованная экономикой Камчатки.

Ключевые слова: экономика, энергетика, энергия воды, энергия тепла Земли, наука, экология, дотация, лосось

В статье заложен «разумный замысел» Жореса Ивановича Алферова. Физик, Нобелевский лауреат, Академик, ушедший из жизни в 2019 г. 15 марта 2020 года ему бы исполнилось 90 лет. Понятие «разумный замысел» прозвучало от Жореса Алферова на передаче ТВЦ, «Мозговой штурм», в 2013 г.: «Наука должна быть востребована экономикой». Для экономики Камчатского края «разумный замысел» является актуальной проблемой. После распада СССР Камчатка стала глубоко дотационным регионом, с динамикой постоянно растущего дефицита в бюджете. Бюджет края (2019 г.) составил в расходе порядка 81,833 млрд. руб. при плане в 79,886 млрд. руб. В нем субсидий прядка 35,990 млрд. руб. (43,98 % – гос. отчетность). Край на третьем месте по величине выделяемой ему дотации среди 85 субъектов РФ после Дагестана и Якутии. Доля рыбного ресурса, основного природного ресурса в бюджете Камчатского края, составляет 32 % (примерно 26,18 млрд. руб.) Выловленный объем рыбного ресурса в акватории Камчатского края составляет 235 млрд. руб. в денежном эквиваленте. На содержание Петропавловска – Камчатского уходит 13 млрд. руб. Для содержания ПАО «Камчатскэнерго» уходит 17 млрд руб. В расчет не приняты затраты для АО «Корякэнерго» и другие мелкие энергетические компании. Градообразующей промышленности нет. Есть сезонные работы на обслуживании социальных объектов, дорог и рыбная лососевая путина, заполняемая приезжими. Военные, гражданское поселение, социальные объекты и сама энергетика Камчатки – вот основные наполнители бюджета края. Камчатская энергетика субсидирована более чем на 60 % из Государственного бюджета.

Энергетика – хребет социально-экономического развития не только Камчатки, но и любых других регионов и стран. И вполне объяснимо, что «худая» экономика ТЭК для Камчатки стала причиной глубоко субсидированного региона в России. О Камчатке много говорят, что мы рыбный край. Попробуем разобраться. Выловленный объем рыбы в акватории Камчатского края за 2019 г. – 1,490 мил. тонн. Из них всего 378 тыс. тонн приходится на лосось, в США 340 тыс. т. Камчатка – зона повышенного увлажнения. Общее зеркало воды 5 880 кв. км. На территории имеется 135 тыс. рек. Из них 452 реки, 220 больших и малых озер от 1 до 200 кв. км² потенциально пригодных для нереста лосося. По

оценке КамчатНИРО, прогнозная, потенциальная продуктивность всех нерестово-выростных водоёмов Камчатки составляет 1 млн. тонн. Промысловый максимум зафиксирован – до 0,6 млн. тонн. С учетом провальных годов подхода лосося, средний вылов по годам за прошедшие десятилетия составляет для Камчатки – 0,350 млн. тонн. Продуктивность лососевого нерестового фонда Западного побережья выше, чем Восточного на 30 %. Рыбный ресурс исторически не является системообразующим в экономике края. Его недостаточно для вывода региона из категории дотационных регионов РФ. Реальная себестоимость кВт/ч и Гкал в ТЭК – камень преткновения на пути к самодостаточной экономике Камчатки. Пока Камчатский край будет использовать углеводородное топливо в ТЭК (мазут, уголь, газ, дизельное топливо), ему вечно быть глубоко дотационным и экологически грязным регионом, с перспективой уничтожения природы и лосося. Любой форс мажорный сбой в поставках топлива в регион и Камчатка вновь сядет на веерные отключения электроэнергии и тепла. Печальный опыт есть – середина и конец 90-х годов 20-го столетия. Природа Камчатки от действия ТЭК и наплыва автотранспорта гибнет медленно, но верно, из года в год. Причина – использование углеводородного топлива. Министерство энергетик СССР, понимая пагубность выстроенной углеводородной энергетики для Камчатки, планировало в начале 60-х годов перевести ее на ГЭС, планируя построить каскад ГЭС на р. Кроноцкой. По политическим, а не по экономическим и экологическим мотивам – сорвалось. В 70-80-х годах планировалось строительство каскада Жупановских ГЭС, вновь по той же причине сорвалось. В обоих случаях помешали пролоббированные интересы атомщиков в реализации своих АЭС на Камчатке. Влияние руководства атомной промышленностью на первые лица в Правительстве и ЦК КПСС, в модном направлении развития АЭС, предоставляло им первоочередность в строительстве атомных станций. Не совершенство проектов, скороспелые ТЭО, отсутствие отечественных технологических энергоустановок нужной мощности (надо было заказывать во Франции) – не позволило родиться АЭС на Камчатке. После безуспешных попыток руководства атомной промышленностью СССР построить на Камчатке АЭС, оно отказались от этой затеи. Это дало возможность Министерству энергетики СССР в 1987–1988 г. принять долгожданное решение построить каскад Жупановских ГЭС и заместить существующие ТЭЦ, ДЭС, котельные. Принятое решение вошло в Госплан и Министерство финансов страны. Не состоялось. В лице партийного руководства обкома КПСС и администрации Елизовского района, руководителя облисполкома Камчатской области, при развале СССР, постыдно сорвали реализацию проекта, отказавшись от своего же принятого решения. Это очень жестоко аукнулось для населения Камчатки и ее экономики. Во второй половине 90-х годов (через 8 лет), жители Петропавловска Камчатского, Елизово и ЗАТО Вилучинск вымерзали и погибали от веерных отключений электроэнергии и тепла. Город походил на блокадный Ленинград времен Великой Отечественной войны. Камчатка оказалось заложником форс мажорных обстоятельств от смены политического курса, поставок топлива и высокой стоимости энергетических тарифов. Новое областное административное руководство Камчатки, вместо реализации каскада ГЭС на реке Жупанова или на реке Кроноцкой, имея на то все основания, изложенные в проектных разработках «Ленгидропроект», ринулись добывать свой газ. На первый взгляд решение разумное, но не просчитанное по экономическим показателям, без экспертизы, это оказалась дорога в прошлое. Ошиблись в запасах по газу, вернулись к поставкам мазута. Построили очень дорогую, не надежную Мутновскую Гео ЭС в кратере потухшего вулкана Жировской, рядом с действующими вулканами Мутновский и Горелый. Хотя вулканологи сами утверждают, что потухших вулканов не бывает. Цена тарифа круто скакнула вверх. Похоже прошлое ничему не научило и Министерство энергетики РФ вновь собирается поставлять в ТЭК Камчатки завозной газ от НОВОТЭК, не отказываясь от мазута. Вновь сказки про низкую стоимость тарифа. А про экологию – ни слова, что ее надо спасать. Для информации. В среднем по году за прошедшие 20 лет на территорию Камчатки от деятельности ТЭК выбрасывается 10 тыс. тонн в год SO₂ и NO₂. К этому надо добавить выбросы угарного газа до 900 тыс. тонн в год. Это все без учета вредных выбросов от обилия

автомобильного транспорта. Экология края медленно, но верно гибнет. Наука на экономику края не работает. Ее научные интересы работают на коммерческие структуры ТЭК и во вред экологии природы на Камчатке. Не освоенный богатый природный ресурс «энергии воды» рек и морских приливов Пенжинской губы, Охотского моря – проигнорированы наукой. Ставка сделана на массовый туризм в спасении экономики края. Но массовый туризм для Камчатки – это гибель ранимой природы Камчатки. Каждый турист в день наносит вред природе, оставляя ей: 2 кг мусора, 2 кг мочи, 1 кг фекалий и 1 кг метана. За 2018 год их набралось до 215 тыс на Камчатке. А если каждый из них задержится на 10 дней? К этому надо добавить экологический вред от употребления ими кВт/ч и Гкал. Передвижения на автотранспорте на высоко проходимой технике. Основной природный ресурс Камчатки – «энергия воды», а не лосось, вопреки мнению многих из нас! Лосось без воды существовать не может, также как человек без электроэнергии – или быть ему дикарем. Увеличение объемов воды ведет к увеличению объемов добычи лосося. Вода, это источник жизни и энергии и всего живого, человека, включая науку и экологов. И чем больше площади водоемов на территории Камчатки, тем больше шансов ей сохраниться в своей природной красоте. Энергия воды не нуждается в добыче и вечная в природных запасах. Ей нет равных по низкой себестоимости кВт/ч и Гкал среди всех видов генерации, которые сегодня освоило Человечество. В геотермальной энергетике присутствует вода, но как теплоноситель наиболее эффективный для теплоснабжения, а не в производстве электроэнергии. Министерство энергетики РФ упорно предлагает Камчатке сжигать углеводородное топливо. Лишает Камчатку быть регионом с высоким уровнем социально-экономического развития, без дотаций и субсидий. А наука и экологи убеждают нас, что на Камчатке плотины на реках и при них ГЭС – вред природе, лосося и Человеку. Камчатке Богом или Высшим космическим разумом дарована возобновляемая «энергия воды» и лосось. Просто надо этим разумно воспользоваться. Что объединяет и различает Геотермальную энергетiku и энергию Воды? Пробуем разобраться. Геотермальная энергетика – это извлечение тепла из Земли, вторично – получение электроэнергии из тепла. Основным носителям тепловой энергии в геотермальной энергетике является вода. Она же преобразует тепло Земли в электроэнергию. Энергия воды (рек, морских приливов) – это извлечение электроэнергии из предварительно запасенной потенциальной энергии воды, вторично – из электроэнергии получают тепло.

К.П.Д. извлечения энергии в геотермальной энергетике: тепла – 92 %, электроэнергии до 25 %. К.П.Д. в «энергии воды»: электроэнергии – 97 %, тепла из электроэнергии – 92 %. Вода в геотермальной энергетике имеет в своем составе растворенные микроэлементы той породы, где она находится. Зачастую, это довольно агрессивная и вредная для экологии пароводяная смесь с высокой температурой. Геотермальная энергия – не относится к экологически чистым энергоисточникам в эксплуатации. Выводы ученых из Японии подтверждают это. Пароводяная смесь геотермальной энергетике несёт в себе вредные компоненты, как сероводород (до 7 г. на 1 квт. час.), мышьяк, ртуть, углекислый газ (до 0,74 кг на 1 квт. час), выбросы кремнезёма. Как энергоисточник имеет элемент непредсказуемости теплового поля, особо в местах с высокой сейсмичности. Присутствует опасность разрушения инженерных строений. Для ГЭС и ПЭС такой угрозы нет. Поэтому Япония освоила энергию рек на 85%, а Гео ЭС чуть более на 0,2% из 241,5 ГВт. Для извлечения энергии воды рек и морских приливов – строят дамбы. Образуют водохранилища, а при них ГЭС и ПЭС. Уровень водохранилища определяет запасенную потенциальную электроэнергию воды. Эксплуатации ГЭС и ПЭС не наносят вред экологии Земли в получении электроэнергии. Вред экологии наносится при сооружении плотин. Происходит затопление части суши. Возможно приведет к незначительному изменению локального климата, что для Камчатки очень сомнительно, из-за ее расположения между Охотским морем и Тихим океаном. Биологическая форма жизни на затопляемой территории не остается безжизненной, а заполнится лососем. Просто одна форма биологической жизни переходит в другую. Не надо ничего копать, сверлить, добывать, транспортировать, сжигать, чтоб получить самый дешевый и экологически чистый кВт/ч, тепло (Гкал). Президент РФ,

В.В. Путин, в октябре 2014 г. поддержал обращение Губернатора Камчатского края о строительстве Жупановских ГЭС, дав указание Министру энергетики РФ А.В. Новаку: «Рассмотреть и поддержать». Экологи и наука по сей день поставляют не достоверную информацию в Министерства и ведомства РФ по возможности реализации ГЭС на р. Жупанова. Министерство РФ ссылается в своих доводах перед Президентом РФ на эту информацию. А в информации больше домысла, страшилок и всевозможных предположений, далеких от реальности на местности. Мнение специалистов проектного института «Ленгидропроека», за плечами которых сотни таких проектов в подобных по климату и сейсмике мест на Земле – игнорируется. Начиная с 2014 г. из года в год откладывать Указание Президента РФ «Рассмотреть и поддержать» реализацию ГЭС на Камчатке. Когда «припечёт», скоротечно придется вновь воздвигнуть или модернизировать углеводородные ТЭЦ, ДЭС и котельные. Решение этой проблемы есть! Ввод в эксплуатацию 5-ти ГЭС (ГЭС-1 на р. Жупанова и малые ГЭС в долине р. Камчатки) и 4-х ПЭС. Это позволит обеспечить на 100 % население Камчатского края электроэнергией и теплом от «энергии воды» (электроэнергия, водород). Предоставит возможность России поставлять на рынок АТР с территории края водород, от электролиза воды на ПЭС. Министерством ЖКХ и Э Камчатского края разработано Стратегию развития энергетики Камчатского края до 2035г с перспективой до 2050 г. Туда входит: ГЭС-1, ГЭС-2 на реке Жупанова; Малые ГЭС в Усть-Камчатском районе на реке Кававля, Большая Хапица, Белая. Малые ПЭС в заливах Пенжинской губы: возле с. Манилы и заливы через перешеек, напротив пос. Оссора и Тымлат (расположенных на восточном берегу Камчатки) и в заливе Мелководный. ПЭС в заливе Мелководный – коммерческий проект, для производства водорода более 500 тыс. тонн в год. Цена 1 кг. водорода – \$10. За год реализация водорода составит 5 млрд. \$ (или 315 млрд. руб.), что выше годового дохода от всего рыбного ресурса Камчатки на 30 % и может принести поступление в бюджет до 117 млрд. руб., что на 37 млрд. больше бюджета Камчатского края. «Энергия воды» и лосось – вот решение застарелой экономической проблемы Камчатского края, против которых борется наука и экологи.

Список литературы

Кирюхин А. В., Сугробов В. М. Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // Вулканонология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019650-65>.

Modeling the conditions of functioning of geysers under the influence of Podprudnoy Lake-2 (Kronotsky Reserve, Kamchatka)

Tatyana V. Rychkova, Olga O. Usacheva

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
tvr62@mail.ru*

The paper considers the results of TOUGH2 – EOS1 modeling of the impact of Lake Podprudnoye-2, formed in the Valley of Geysers as a result of mudflows, on a two-phase geothermal reservoir. The simulation results showed the possibility of meteoric water infiltration into the hydrothermal system when two-phase conditions are set in the hydrothermal reservoir.

Keywords: TOUGH2 – modeling, geysers, boiling springs, two-phase geothermal reservoir, caprock, permeability, gas saturation, temperature, pressure, discharge rate, dilution, infiltration

Моделирование условий функционирования гейзеров под воздействием Подпрудного озера-2 (Кроноцкий заповедник, Камчатка)

Т.В. Рычкова, О.О. Усачева

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

В работе рассматриваются результаты TOUGH2 – EOS1 моделирования влияния Подпрудного озера-2, образовавшегося в Долине Гейзеров в результате схода селя, на двухфазный геотермальный резервуар. Результаты моделирования показали возможность инфильтрации метеорных вод в гидротермальную систему при задании двухфазных условий в гидротермальном резервуаре.

Ключевые слова: TOUGH2 – моделирование, гейзеры, кипящие источники, двухфазный геотермальный резервуар, водоупор, проницаемость, газонасыщение, температура, давление, расход разгрузки, инфильтрация

Введение

3.01.2014 г. в верхнем течении р. Гейзерной на левом берегу произошел обвал риолит – дацитовый экструзии (αξQ34), вызвав сход селя, который полностью заблокировал кипящий источник 54 (Хлоридный), горячие источники 56 (Кислый Котел), N16 и N17 (возникшие после оползня-обвала 3.06.2007), и значительно повредил гейзеры в районе Нижне – Гейзерного поля. Сель создал дамбу и еще одно озеро – Подпрудное озеро-2. После схода селя установлены изменения термогидродинамических – химических параметров для двух основных гейзеров Долины Гейзеров.

В гейзере Большом произошло очередное снижение ИВЕ от 60 мин (2007–2013 гг.) до 44 мин и появилась тенденция к его удвоению (утроению) с некоторыми «пропущенными» (или менее мощными) извержениями. Кроме того, в воде гейзера произошло увеличение рН и снижение концентрации гидрокарбонат-иона (Kiryukhin et al., 2018).

В гейзере Великане произошло изменение ИВЕ от 340 мин (2007–2013 гг.) до 40 мин на сентябрь 2016 г. (пройдя значение ИВЕ 90 мин в апреле 2014 г. и 130 мин в сентябре 2014 г.). Произошло увеличение рН, снижение концентрации HCO_3 , дальнейшее снижение концентраций Cl -иона, свободного CO_2 и температуры воды в канале.

Одной из возможных причин таких изменений может быть инфильтрация холодной воды из Подпрудного озера-2 в гейзерный резервуар. Эта проблема рассмотрена на профильной TOUGH2 – EOS1 + трассер модели в диссертационной работе (Рычкова, 2020) (где было задано однофазное состояние резервуара). Результаты моделирования показали,

что в возможном диапазоне повышения давления за счет подпора озера (2,5 – 4 бара) инфильтрация метеорных вод в однофазный резервуар возможна на глубину 30-40 метров. И даже при задании экстремального значения подпора (7 бар) инфильтрация на глубину больше, чем 40-45 м не произошла. Зона теплового воздействия Подпрудного озера-2 выражается в формировании в гейзерном резервуаре линзы холодной воды под озером без теплового и гидродинамического воздействия на гейзерный резервуар в целом. Результаты моделирования не показали влияния Подпрудного озера-2 на исчезновение источников 54, N16 и N17, а также на изменение термогидродинамических – химических параметров для двух основных гейзеров Долины Гейзеров. В данной модели влияние озера на источник 56 не рассматривалось, т. к. он фактически находится в зоне двухфазного состояния флюида.

В дальнейших поисках причин разбавления термальных вод гейзеров и горячих источников метеорными водами и причин исчезновения источников на Верхне-Гейзерном поле проведено еще одно исследование с целью определения условий, способствующих инфильтрации метеорных вод из озера в гейзерный резервуар. Принципиальное отличие нового исследования заключается в том, что на верхней границе резервуара в районе Верхне-Гейзерного поля заданы двухфазные условия (рис. 1), наличие которых отмечается в работе (Кирюхин и др., 2012). Задача решается с помощью концептуальной (качественной) модели TOUGH2 – EOS1.

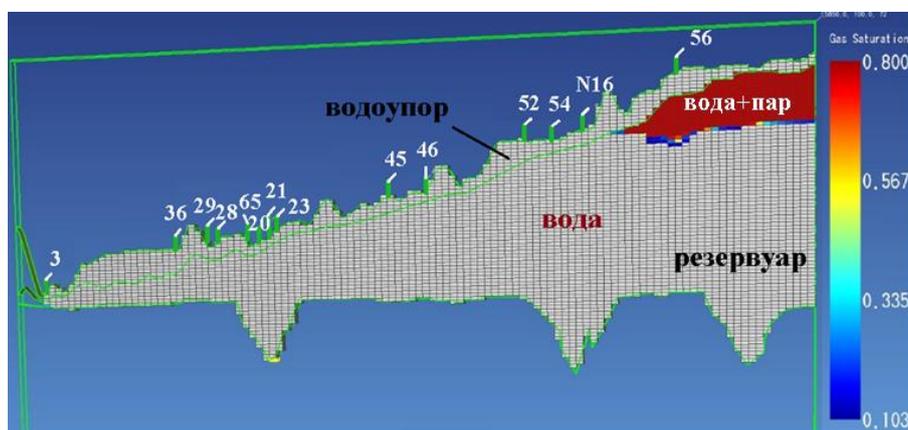


Рисунок 1 – Модель TOUGH2–EOS1 с двухфазным резервуаром в районе Верхне-Гейзерного поля

Распределение температуры, давления, размер области паронасыщения, поле скоростей фильтрации жидкости и пара в естественных условиях гидротермальной системы показано на рис. 2.

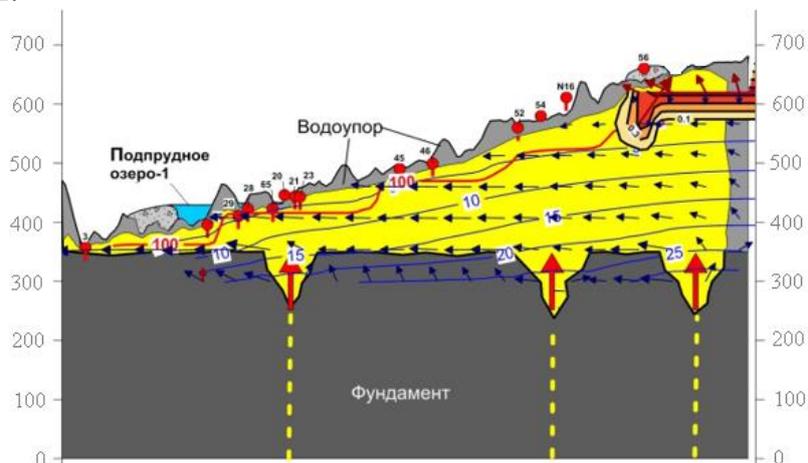


Рисунок 2 – Моделирование естественного состояния двухфазного гейзерного резервуара (от Устьевого участка до Верхне – Гейзерного) до возникновения Подпрудного озера-2: синие линии – распределение давления, бар; черные линии – газонасыщение; красная линия – изотерма 100°.

Векторами показано поле скоростей фильтрации (синими – жидкости, красными – газа). Расположение и нумерация гейзеров соответствует принятым в работе (Кирюхин, Рычкова, 2011)

В резервуаре заданы неизотермические условия, т.е. условия изменяющейся температуры. Моделирование выполнено на 20 лет.

По **результатам моделирования** проанализированы основные параметры, характеризующие резервуар – давление, температура, расход разгрузки гейзеров и горячих источников, содержание газа и скорость фильтрации жидкости и газа.

Анализ изменения давления в резервуаре при условии наличия озера на его кровле показывает, что спустя 20 лет в водном резервуаре произошло увеличение давления на 3-4 бара. В двухфазном резервуаре, в естественном состоянии характеризовавшемся давлением ниже атмосферного, в большей его части произошло увеличение давления на 1-2 бара. А в той его части, которая находится под водоупором в районе источника 56, произошло снижение давления.

Анализ изменения расхода разгрузки всех гейзеров и источников модели подтверждает общее увеличение давления в резервуаре и выражается в увеличении расхода на величину, зависящую от расстояния и гидравлической связи с озером-2 (рис. 3а). Максимальное увеличение расхода разгрузки (1,5 л) пришлось на источник 56, на источники 52, 54 и N16 пришлось 0,3 л/с. Пик увеличения расхода разгрузки в источнике 56 до 58,7 л/с пришелся на первый момент после образования плотины и подпора озера-2 (этап моделирования 1 год 3 мес). Но к концу моделируемого периода стал на 1,5 л/с больше, чем в естественном состоянии гидротермальной системы.

Анализ изменения температуры в зонах водопритока гейзеров и источников показывает, что в зоне водопритока практически всех моделируемых гейзеров и источников температура отреагировала на увеличение давления в резервуаре и выражается в значениях +1,7, 0,2 и 0,1° по мере удаления от озера-2. Для модельных источников 52 и 54 повышение температуры произошло на 15 и 18°. Но уже для источника N16 наблюдается падение температуры на 2°. А для источника 56 произошло падение температуры на 75,4° (рис. 3б).

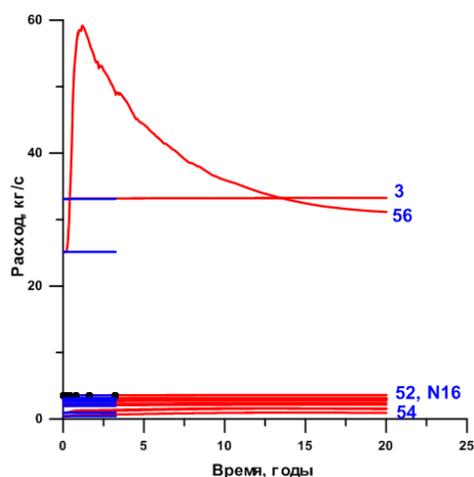


Рисунок 3а – График изменения расхода разгрузки гейзеров и источников в течение 20 лет после появления Подпрудного озера-2. Короткие линии синего цвета – температура в естественных условиях; длинные линии красного цвета – температура под влиянием Подпрудного озера-2

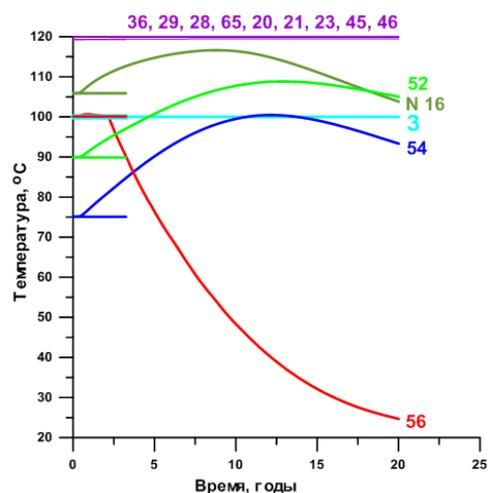


Рисунок 3б – График изменения модельной температуры в источниках и гейзерах: короткие линии соответствующего цвета – температура в естественных условиях; длинные линии соответствующего цвета – температура под влиянием Подпрудного озера-2

Анализ изменения распределения давления в резервуаре, температуры, области распространения двухфазного флюида, скоростей фильтрации жидкости и газа (рис. 4) говорит о том, что именно область распространения двухфазного флюида является наиболее уязвимой для холодных вод. Об этом свидетельствует значительное сокращение области содержания пара, изменившееся расположение изотермы 100° (опустилась на 140-160 м ниже, чем в естественных условиях гидротермальной системы); произошло уменьшение скорости фильтрации жидкости и изменилось ее направление: от озера в резервуар.

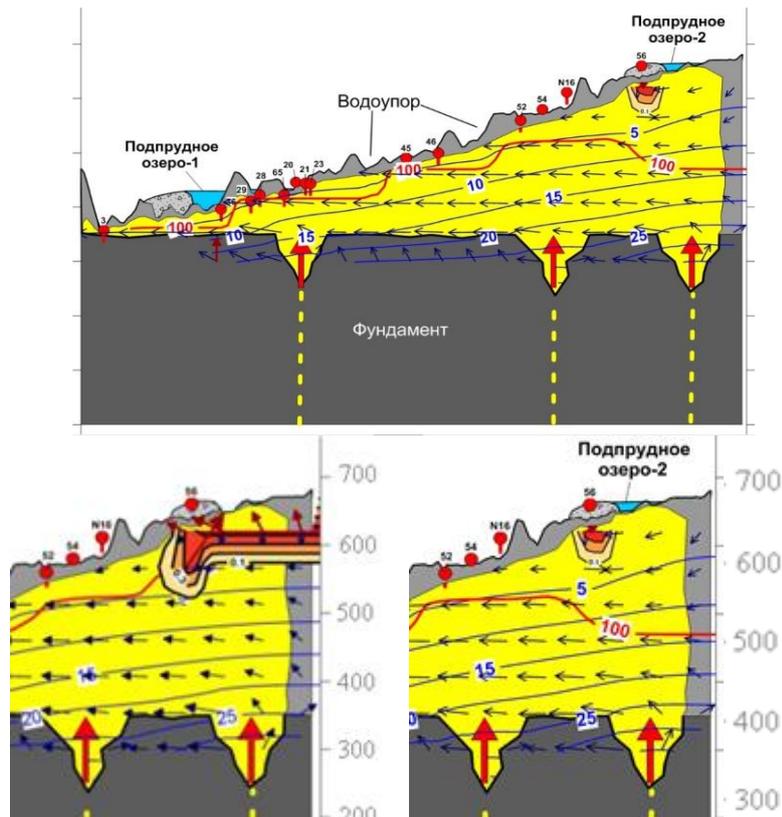


Рисунок 4 – Распределение давления (синие линии), паронасыщения (черные линии) и изотерма 100°C при EOS1 моделировании двухфазного состояния резервуара в районе Верхне-Гейзерного поля в результате инфильтрации из Подпрудного озера-2

Очевидное охлаждение локальной части резервуара и исчезновение источника 56 показывает, что при наличии двухфазных условий в резервуаре вода из озера может заполнить двухфазную часть. Это явление объясняется тем физическим эффектом, когда при наличии двухфазных условий в верхней части резервуара и наличии холодного водоема на верхней его границе, происходит конденсация пара. Это приводит к уменьшению давления в поровом пространстве пород (к процессу, подобному вакуумированию порового пространства) и сложившиеся условия позволяют метеорной воде проникнуть в резервуар.

Выводы

1. В отличие от модели влияния Подпрудного озера-2 на однофазный резервуар, модель влияния на двухфазный резервуар показывает, что при возможности двухфазных условий, происходит вакуумирование и заполнение холодной водой именно двухфазной части резервуара.

2. Модель требует доработки в части калибровки по результатам мониторинга разгрузки гидротерм в Долине Гейзеров, в уточнении исходных параметров, заданных в модели, в уточнении интерпретации выходных данных в программе Surfer.

3. Модель также не показала остывания источников 54 и N56, не показала изменение температуры в каналах гейзеров Большого и Великана, но она важна для понимания условий, при которых инфильтрация метеорных вод может привести к охлаждению, разбавлению термального флюида и остыванию источников.

4. Задачей дальнейших исследований является моделирование возможной инфильтрации метеорных вод (учитывая масштабы селя 2014 г. и возможное повреждение водоупора в русле р. Гейзерной) на участке термальной разгрузки между гейзером Великан и Верхне-Гейзерным термальным полем как причины столь значительных изменений гидрохимических и газотермодинамических параметров двух основных гейзеров в Долине Гейзеров.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 18-05-00052.

Авторы выражают благодарность Кирюхину А.В. за постановку задачи и консультации.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Условия формирования и состояние ГТС Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) / *А.В. Кирюхин, Т.В. Рычкова* // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2011. № 3. С. 238–253.
2. *Kiryukhin A.V.* Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kamchatka) and triggers of the Giant landslide / *A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova, I.K. Dubrovskaya* // Applied Geochemistry Journal. 2012. № 27. P. 1753–1766.
3. *Кирюхин А.В.* Анализ гидрогеологического режима ГТС Долины Гейзеров (Кроноцкий заповедник, Камчатка) после катастрофы 3.06.2007 / *А.В. Кирюхин, Т.В. Рычкова, Е.О. Дубинина* // Вулканология и сейсмология. 2015. № 1. С. 3–20.
4. *Рычкова Т.В.* Гидрогеологический анализ условий формирования и функционирования гейзеров (на примере гидротермальных систем Камчатки): автореф. дис. канд. г.-м. наук, URL: <http://crust.ru/images/upload/newfull184/2106.pdf> (Дата обращения: 05.08.2020)

УДК 556.332.52

Theis Solution in Two-Phase Conditions

Mariia Wilkina

*Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia
wilkina.mari@gmail.com*

In this article we considered combinations of the different components such as water, vapor, CO₂ and air maintenance to influence pressure decrease in observation wells. Theis equation describes a single-phase water movement in the homogenous environment. To observe and compare pressure dropdowns in the two-phase systems the program package TOUGH2 was used.

Key words: analytical solutions, Theis equation, two-phase conditions, TOUGH2

Задача Тейса в двухфазной постановке

М.В. Вилькина

Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена анализу фильтрации многокомпонентного флюида в однородном, неограниченном в плане водоносном горизонте. Понижения, возникающие в таких горизонтах при откачке однокомпонентного флюида, хорошо описываются уравнением Тейса. Для двухфазного флюида производится сравнение понижений в зависимости от компонентов системы (вода, пар, CO₂, воздух). Процесс откачки смоделирован в программном комплексе TOUGH2.

Ключевые слова: аналитические решения, решение Тейса, двухфазные условия, TOUGH2

Введение

Классическое решение, описывающее плоскорадиальную фильтрацию жидкости к скважине, было получено Тейсом в 1935 году (Theis, 1935). Условием его применения является откачка с постоянным дебитом из неограниченного в плане, изотопного, напорного водоносного горизонта. В таких условиях понижение напора находится по следующей формуле:

$$S(r, t) = -\frac{Q}{4\pi T} \cdot E_i\left(-\frac{r^2}{4at}\right) \quad (1)$$

в случае, когда значение аргумента $\frac{r^2}{4at} < 0,1$ применима логарифмическая аппроксимация:

$$S(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} \cdot \ln \frac{2,25at}{r^2} \quad (2)$$

где S , Q , T , a , t , r – понижение напора, скважинный расход, водопроницаемость пласта, пьезопроводность пласта, время работы скважины и расстояние от центральной скважины до наблюдательной соответственно.

Однако данное фундаментальное решение применимо лишь для условий изотермичной однофазной фильтрации. Исследование изменения напоров в однокомпонентной двухфазной системе (вода – пар) и в двухкомпонентной двухфазной системе (вода – неконденсирующиеся газы) проводилось в программном комплексе TOUGH2.

Сборка модели

Для модели была выбрана радиально-цилиндрическая разбивка. Данное преобразование позволило сократить время вычислительных процессов программы, не нарушая физического смысла задачи. Положение откачивающей скважины (pump) с дебитом 20 кг/с было задано в первом модельном блоке радиусом 0,1 м. Для наиболее точного пространственного положения наблюдательной скважины модель была собрана из двух частей: первой, длиной 45,5 м и второй 9949,5 м с тем, чтобы центр наблюдательной скважины располагался ровно в 50 м от откачивающей скважины. Таким образом моделируемая область представлена 200 блоками, радиус модели составил 10000 м, мощность 20 м.

Физические свойства пород

Для преобразования размерностей фильтрационно-емкостных параметров, используемых в гидрогеологии, в систему СИ были использованы следующие формулы:

$$k = \frac{K \cdot \mu_w}{\rho_w \cdot g \cdot 86400} \quad (3)$$

где k , K , μ_w , ρ_w , g – коэффициент проницаемости, коэффициент фильтрации, вязкость воды, плотность воды и ускорение свободного падения соответственно.

$$C = \frac{k \cdot 86400}{\mu_w \cdot \phi \cdot a} \quad (4)$$

где C , k , μ_w , ϕ , a – сжимаемость, коэффициент проницаемости, пористость и пьезопроводность соответственно.

Физические свойства пород, использованные в настоящей модели приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физические свойства пород

| физическая характеристика | условное обозначение | значение | размерность |
|---------------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| минеральная плотность | ρ | 2600 | кг/м ³ |
| Пористость | Φ | 0,35 | д.ед. |
| Проницаемость | k | 1 | Дарси |
| Теплопроводность | λ | 2 | Вт/м °С |
| удельная теплоемкость | C_R | 1000 | Дж/кг °С |
| Сжимаемость | C | 5×10^{-8} | Па ⁻¹ |

Начальные условия

В программе TOUGH2 собранная модель была протестирована в различных модулях состояния EOS1, EOS2 и EOS3 (табл. 2).

Таблица 2. Условия системы

| Модуль состояния | Компоненты | Фазы | Газонасыщенность | Примечания |
|------------------|-----------------------------------|--------------|------------------|-----------------------------|
| EOS1 | H ₂ O | жидкость | 0 | T = 25C |
| EOS1 | H ₂ O, пар | жидкость/газ | 0,01 | — |
| EOS2 | H ₂ O, CO ₂ | жидкость/газ | 0,01 | P(CO ₂) = 0,5Ba |
| EOS3 | H ₂ O, воздух | жидкость/газ | 0,01 | T = 25C |

Также в программном пакете ANSDIMAT (Синдаловский, 2014), для условий, отвечающих однофазной фильтрации, были рассчитаны понижения по формуле Тейса (1). Данный программный пакет позволил повысить точность вычислений, отказавшись от логарифмической аппроксимации (2).

Полученные в результате откачки понижения в наблюдательной скважине на момент времени 30 лет представлены на графике в координатах изменения давление (ΔP , Ва) – время (t, года) (рис. 1).

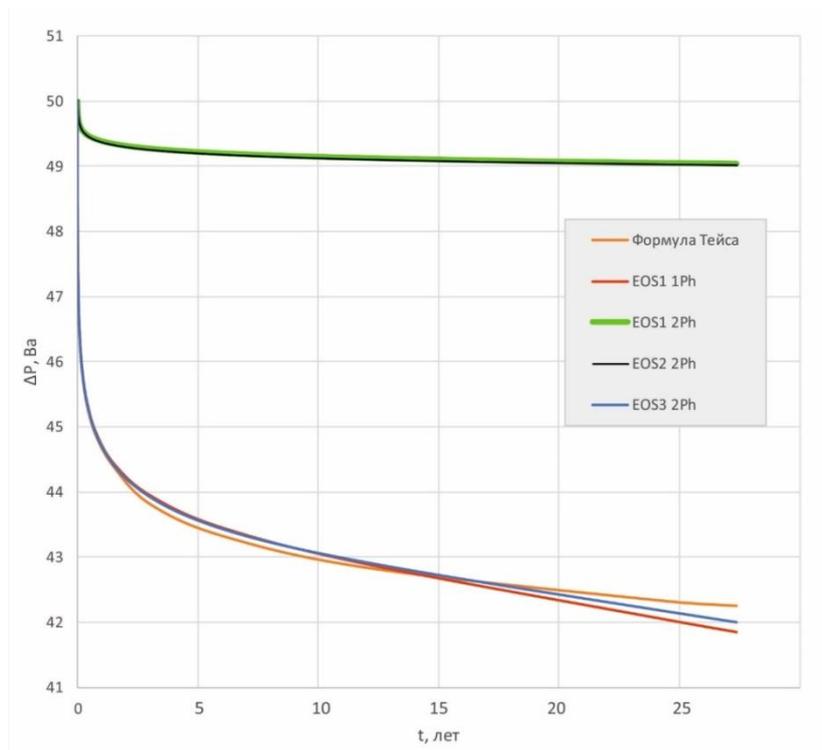


Рисунок 1 – График зависимости падения давления от времени для различных модулей состояния

Выводы

На графике видны два тренда падения давления – сильное падение с 50 до 42 Бар на конечный момент времени, а также относительно небольшое падение с 50 до 49 Бар. Данное отличие может быть объяснено различными свойствами газовой компоненты. На основе полученных данных видно, что воздушная смесь, в отличие от водяного пара и CO₂, вероятно в меньшей степени уменьшает проницаемость пласта, что отражается в более выраженном падении давления.

Интересным, также, оказалось расхождение между результатами TOUGH2-моделирования однофазной системы и формулой Тейса, описывающей данные условия. Это объясняется тем, что в аналитическом решении и в TOUGH2-модели по разному аппроксимируется зависимость пористости от эффективного напряжения при осушении горной породы.

Список литературы

1. *Кирюхин В.К.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем 2018. Эко-Вектор, Санкт-Петербург. 431 с.
2. *Синдаловский Л.Н.* Аналитическое моделирование опытных опробований водоносных пластов и скважинных водозаборов (программный комплекс ANSDIMAT) Спб.: Наука, 2014. С. 512.
3. *Pruess, K.* TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. / K. Pruess, C. Oldenburg, G. Moridis Berkeley, California. 1999. P. 198.
4. *Theis C.* The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Ground Water Storage. Reports and papers, Hydrogeology. 1935. P. 519–524.

УДК 550.341.5

Reproduction of a basic scenario for the formation of a geothermal field

Polina V. Kochetkova

*Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
pvkoch@yandex.ru*

Using PetraSim v. 5.2 software, the basic scenario of the formation of a geothermal field is reproduced. The 3D model includes its main attributes: (1) domains – reservoir and upper confinement (caprock); (2) boundary conditions: area of water supply (fixed state $P = 1$ bar, $T = 10$ °C) and lateral discharge ($P = 35$ bars); (3) the zone of inflow of the deep coolant into the geothermal reservoir (Mass Sources: flow rate 25 kg/s, enthalpy 1085 kJ/kg).

Keywords: geothermal field, 3D-model, geothermal reservoir

Воспроизведение базового сценария формирования геотермального месторождения

П.В. Кочеткова

Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, Россия

С использованием ПО PetraSim v.5.2 воспроизведен базовый сценарий формирования геотермального месторождения. 3D модель включает основные его атрибуты: (1) домены – резервуар и верхний водоупор (caprock); (2) граничные условия: область водного питания (fixed state $P = 1$ bar, $T = 10$ °C) и латеральной разгрузки ($P = 35$ bars); (3) зона притока глубинного теплоносителя в геотермальный резервуар (Mass Sources: расход 25 kg/s, энтальпия 1085 кДж/кг).

Ключевые слова: геотермальное месторождение, 3D-модель, геотермальный резервуар

Был воспроизведен базовый сценарий формирования геотермального месторождения. Размеры модели 2 км × 1 км в плане, подошва резервуара определяется на абс. отм. –1500 м, кровля модели совпадает с топографической поверхностью (рис. 1). Вычислительная сетка, изображённая на рисунке 2, является прямоугольной 21 × 10 × 12, неравномерной по оси X и Z (что демонстрирует возможности адаптации вычислительной сетки к описанию локальных особенностей модели).

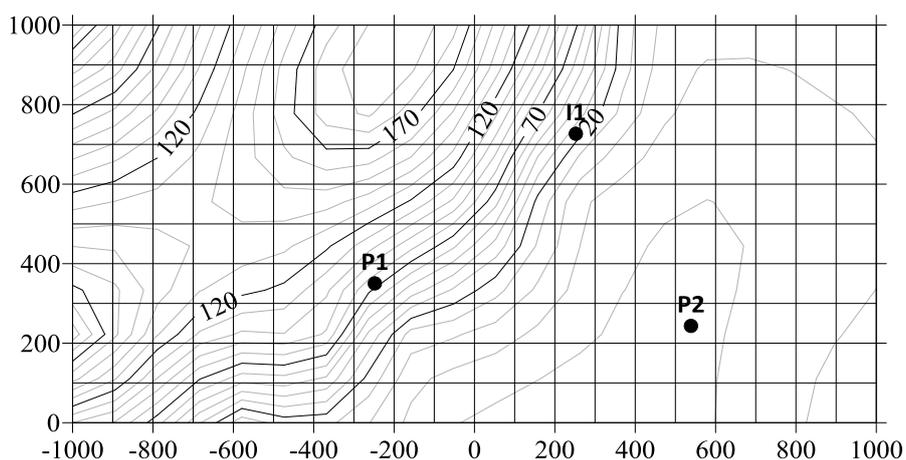


Рисунок 1 – Контурная карта поверхности модели с нанесёнными скважинами

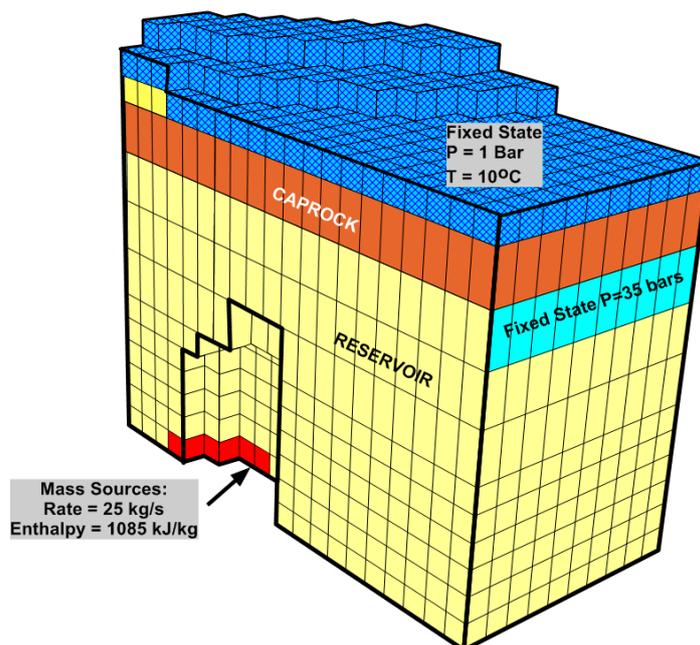


Рисунок 2 – Вычислительная сетка модели

При зонировании модели используются три домена с различными фильтрационно-емкостными и теплофизическими свойствами: проницаемый резервуар, относительно непроницаемый верхний водоупор (caprock), зона разгрузки (aquifer). Граничные условия задаются на кровле модели-топографической поверхности как условия Дирихле 1 рода (fixed state) с постоянным давлением 1 бар (атмосферное давление) и температурой 10 °С (средняя температура земной поверхности). Граничные условия на боковой поверхности (домен aquifer) отражают условия разгрузки, они также задаются как условия Дирихле 1 рода (fixed state), с постоянным давлением 35 бар, при этом значение температуры не имеет значения, т.к. в домене задается нулевая теплопроводность. В основании модели с помощью источников типа MASS определяется приток глубинного теплоносителя с расходом 25 кг/с и энтальпией 1085 кДж/кг. Время моделирования задается равным 20 000 лет, геологически возможное время для формирования геотермального месторождения и физически достаточное время для формирования условий близких к стационарным (установившимся). В результате модель показывает возможность формирования геотермального резервуара с температурой до 250 °С. Моделирование естественного состояния (гравитационно-термогидродинамического равновесия) является необходимым этапом подготовки корректной термогидродинамической модели геофлюидного резервуара.

Второй этап решения задачи 3 включает моделирование 20-летней эксплуатации, для этого на модель устанавливаются две добычные и одна инъекционная скважины с расходом,

зависящим от времени. Значения температуры и давления модели на уровне –950 метров представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

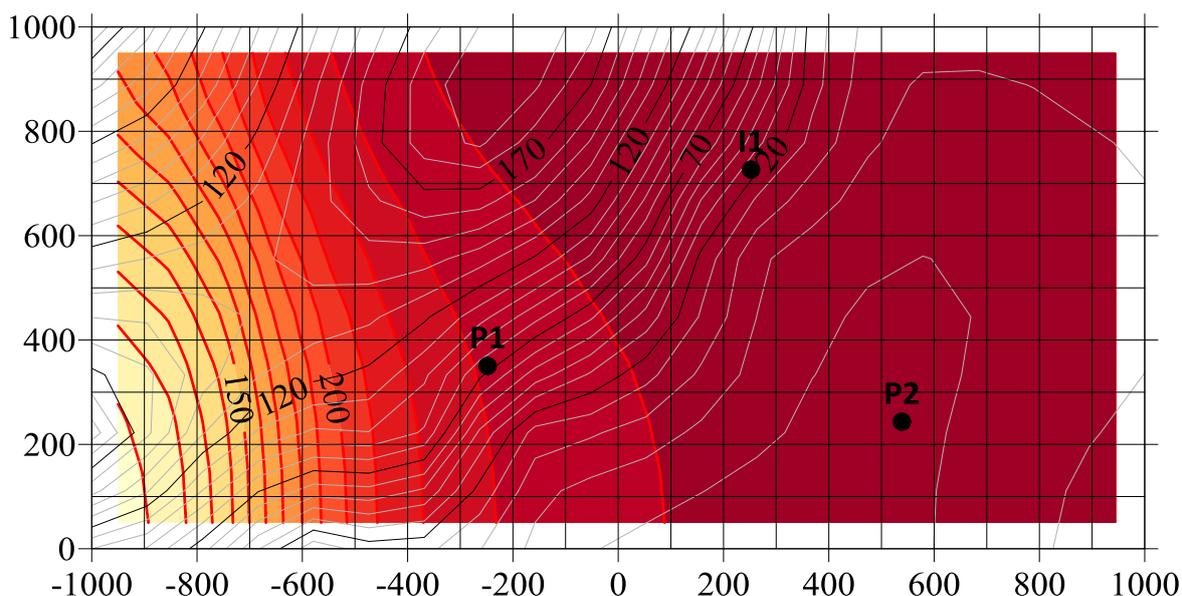


Рисунок 3 – Карта температуры модели на уровне –950 метров

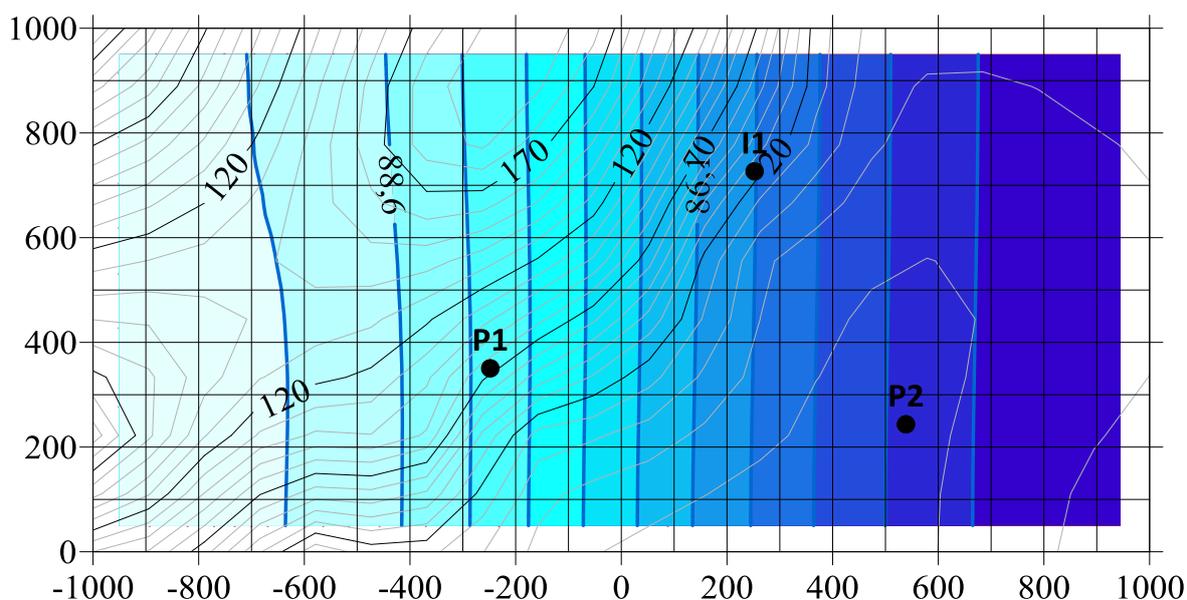


Рисунок 4 – Карта давления модели на уровне -950 метров

Вывод: в программе Surfer мною была создана модель базового резервуара, с помощью которой можно проанализировать процесс формирования геотермального месторождения на протяжении 20000 лет, а также наглядно увидеть градиентные изменения значений температуры и давления на уровне –950 метров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту № 18-05-00052-19.

Список литературы

1. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем СПб.: Вектор-Ай-Пи. 2020. 400 с. (в печати).

**CHAPTER V. MODELING THE NATURAL STATE
AND EXPLOITATION OF GEOTHERMAL RESERVOIRS,
APPLICATIONS TO RESERVES ESTIMATION,
FEASIBILITY STUDY AND INVESTMENT**

**РАЗДЕЛ V. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО РЕЖИМА
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ,
ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ЗАПАСОВ
И ПОДГОТОВКИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ**

УДК 551.49+550.21

**Evaluating the effectiveness of directional drilling
of new wells at the Mutnovsky geothermal field**

Olga O. Usacheva, Tatyana V. Rychkova

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
Lel89@yandex.ru*

The Mutnovsky geothermal field is being developed by two geothermal power plants: Verkhne-Mutnovskaya since 1999, and Mutnovskaya geothermal power plant (MGeoPP-1) – since 2002. Geothermal plants use wells with an age of 28-30 years, many of which are on the verge of decommissioning. To maintain the available capacity of MGeoPP was commissioned a geothermal well Geo-1 in 2008, well Geo-2 and Geo-3 in 2013, Geo-4 in 2014, Geo-5 in 2017. Commissioning of well Geo-6 and the drilling of well Geo-7 planned in 2020. Productive zones of new wells located near North-East productive fault [1, 2, 4, 6, 7]. Only 8 zones of total number 19 are cross productive fault (the distance to the fault plane is less than 200 m). Two of this – near the plane of fault (the distance to the fault plane is less than 400 m). In total, 53 % of the productive zones are located at a distance of up to 400 meters from the plane of the North-Eastern productive fault.

Keywords: directional drilling, Mutnovsky geothermal field, Kamchatka

**Направленное бурение новых скважин
на Мутновском геотермальном месторождении
и оценка его эффективности**

О.О. Усачева, Т.В. Рычкова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

Мутновское геотермальное месторождение разрабатывается двумя геотермальными станциями: Верхне-Мутновской (с 1999 г) и Мутновской геотермальной электрической станцией (МГеоЭС) – с 2002 г. (рис. 1). Геотермальными станциями используются скважины с возрастом 28-30 лет, многие из которых на грани вывода из эксплуатации. Для поддержания располагаемой мощности МГеоЭС в 2008 году в эксплуатацию была введена геотермальная скважина Гео-1, в 2013 г. – скважины Гео-2 и Гео-3, в 2014 г. – Гео-4, в 2017 г. – Гео-5, в планах на 2020 – ввод в эксплуатацию Гео-6 и бурение Гео-7. Из 19-ти вскрытых продуктивных зон четырьмя новыми скважинами Гео-1, 2, 3 и 4 на разлом попадают 8 (расстояние до плоскости разлома менее 200 м). Близки к попаданию на разлом – 2. Итого – 53 % продуктивных зон находятся на расстоянии до 400 метров от плоскости продуктивного разлома Северо-Восточный.

Ключевые слова: направленное бурение, Мутновское геотермальное месторождение, Камчатка

Введение

Мутновское геотермальное месторождение разрабатывается двумя геотермальными станциями: Верхне-Мутновской (с 1999 г) и Мутновской геотермальной электрической

станцией (МГеоЭС) – с 2002 г. (Рис. 1). Геотермальными станциями используются скважины с возрастом 28-30 лет, многие из которых на грани вывода из эксплуатации. В связи с чем возникает необходимость в бурении новых скважин и ввода их в эксплуатацию для поддержания работоспособности МГеоЭС.

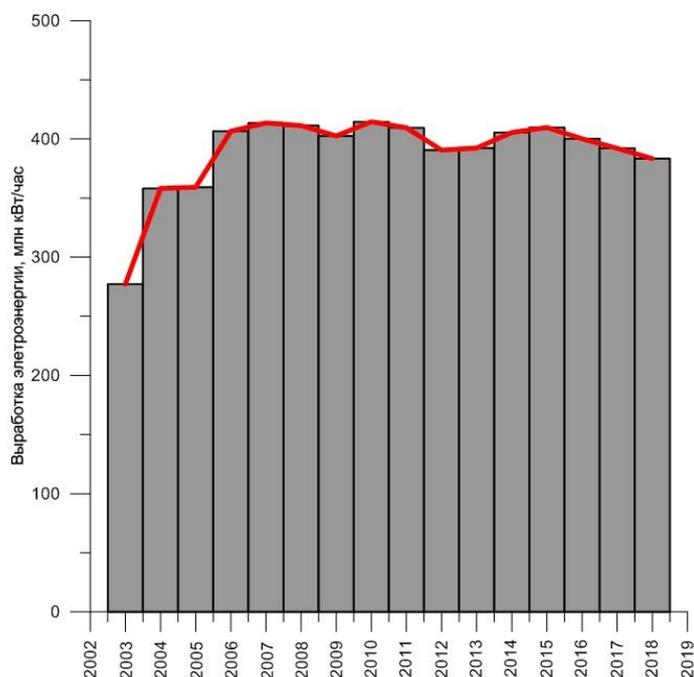


Рисунок 1 – Производительность Мутновских ГеоЭС за период 2003–2018 гг. по данным [8]

Для обеспечения выработки электроэнергии в объеме 50 МВт и устойчивой работы геотермальной станции МГеоЭС в базовом режиме необходимо обеспечить подачу пара порядка 100 кг/с (из расчета 2 кг – 1 МВт). Станция использует ресурсы центрального блока месторождения: продуктивные скважины сосредоточены на небольшой площади 0,2 км², что обуславливает их взаимодействие и снижение продуктивности. Обеспеченность по пару на 01.09.2018 составляла в эквиваленте на электрическую мощность 44 МВт. Часть скважин по параметрам устьевого давления – на грани вывода из эксплуатации.

Для поддержания располагаемой мощности МГеоЭС в 2008 году в эксплуатацию была введена геотермальная скважина Гео-1, в 2013 г. – скважины Гео-2 и Гео-3, в 2014 г. – Гео-4, в 2017 г. – Гео-5, в планах на 2020 – ввод в эксплуатацию Гео-6 и бурение Гео-7.

В данной работе мы располагали данными по четырем новым скважинам: Гео – 1, 2, 3,4: координатами их устья, отклонениями от вертикали в плане, глубиной начала отклонения ствола скважины от вертикали, ГТН скважин (Спектор С.В. и др., 2016). По имеющимся данным была рассчитана инклинометрия скважин, определены относительные отметки устья продуктивных зон скважин.

Ранее были рассчитаны уравнения плоскостей двух продуктивных разломов: «Основной» и «Северо-Восточный», подробно описанных в (Кiryukhin A.V., 1998; 2005; Kiryukhin, A.V., 1993; 2018; 2020). Были найдены расстояния от кровли продуктивных зон скважин Гео – 1, 2, 3 и 4 до плоскостей продуктивных разломов (табл. 1).

Таблица 1. Данные по новым скважинам Гео1, 2, 3 и Гео-4

| Скважина | Продуктивная зона | X, м | Y, м | Z, м | Расход ПВС (по состоянию на 01.09.2016 [5]) |
|----------|-------------------|---------|---------|--------|---|
| Гео-1 | Гео1-1 | 47211,4 | 24367,1 | -192,1 | 57,2 |
| | Гео1-2 | 47134,1 | 24322,6 | -342,7 | |
| | Гео1-3 | 47087,7 | 24295,8 | -433,0 | |
| | Гео1-4 | 46924,3 | 24201,6 | -751,3 | |

| Скважина | Продуктивная зона | X, м | Y, м | Z, м | Расход ПВС (по состоянию на 01.09.2016 [5]) |
|----------|-------------------|----------|-----------|----------|---|
| Гео-2 | Гео2-1 | 46524,1 | 24188,9 | -339,0 | 26,6 |
| | Гео2-2 | 46594,0 | 24217,2 | -508,0 | |
| | Гео2-3 | 46628,1 | 24230,9 | -590,1 | |
| | Гео2-4 | 46699,9 | 24259,9 | -763,6 | |
| | Гео2-5 | 46745,26 | 24278,242 | -873,192 | |
| | Гео2-6 | 46832,22 | 24313,36 | -1083,2 | |
| Гео-3 | Гео3-1 | 46576,76 | 23946,324 | -551,019 | 35,5 |
| | Гео3-2 | 46690,14 | 23866,882 | -845,056 | |
| | Гео3-3 | 46726,78 | 23841,216 | -940,052 | |
| | Гео3-4 | 46786,09 | 23799,662 | -1093,86 | |
| Гео-4 | Гео4-1 | 46390,7 | 23970,466 | -190,782 | 11,9 |
| | Гео4-2 | 46401,24 | 23954,828 | -220,267 | |
| | Гео4-3 | 46476,54 | 23843,125 | -430,87 | |
| | Гео4-4 | 46607,54 | 23648,762 | -797,319 | |
| | Гео4-5 | 46646,69 | 23590,676 | -906,833 | |

Так как по результатам подсчетов по имеющейся информации ни одна из продуктивных зон не вскрыла области разлома «Основной», то в статье приводятся данные по расположению продуктивных зон относительно разлома «Северо-Восточный» (Рис. 2). Из графика видно, что самое близкое расположение продуктивной зоны относительно плоскости разлома у геотермальной скважины Гео-1 – она же, по предоставленным нам данным по договору с компанией J-Power (Kiryukhin A.V., 2016) дает самую большую выработку ПВС (по состоянию на 01.09.2016). Скважина Гео-4 так же находится в пределах 200 метров от продуктивного разлома и проходит субпараллельно ему. На рис. 2 продуктивные зоны скважин, попадающих на разлом (расстояние до плоскости менее 200 м) обозначены зелеными кружками. Скважины Гео-3 и Гео-2 наиболее отдалены от плоскости разлома и близки к попаданию на него (на Рис. 2 обозначены синими кружками).

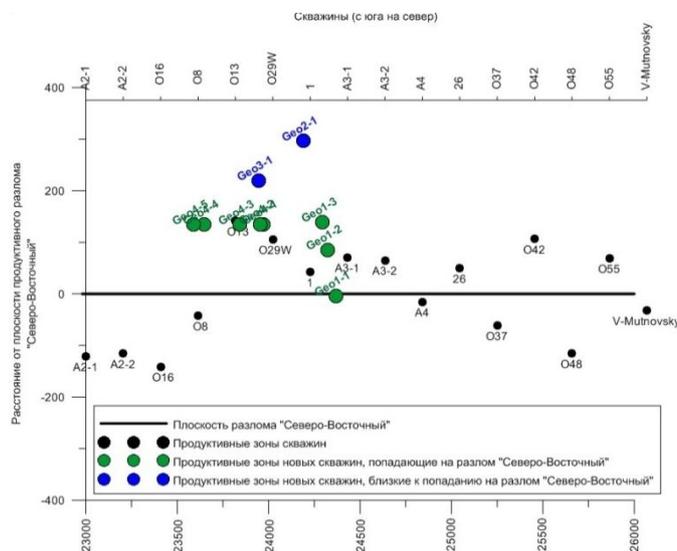


Рисунок 2 – Расстояние от расчетной плоскости разлома «Северо-Восточный» кровли продуктивных зон добычных скважин на Мутновском геотермальном месторождении

Заключение

Отвечая на вопрос об эффективности направленного бурения на Мутновском месторождении можно выделить следующие основные положения:

1. Из 19-ти вскрытых продуктивных зон четырьмя новыми скважинами Гео-1, 2, 3 и 4 на разлом попадают **8** (расстояние до плоскости разлома менее 200 м). Близки к попаданию на разлом – 2. Итого – **53 %** продуктивных зон находятся на расстоянии до 400 метров от плоскости продуктивного разлома Северо-Восточный.

2. Для более детального анализа необходимы оригинальные данные по инклинометрии и поинтервальной продуктивности скважин Гео-1, Гео-2, Гео-3, Гео-4, и новых (Гео-5 и Гео-6), пробуренных на месторождении после 2016 г. Это полезно для прогноза энергоэффективности геотермальных станций Мутновского месторождения, оптимизации бурения дополнительных скважин с целью выведения дополнительных запасов, понимания процессов теплопереноса в геотермальной системе.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ по проекту 18-05-00052. Авторы выражают благодарность Кирюхину А.В. за постановку задачи и консультации.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Исследование условия водного питания Мутновского геотермального месторождения с использованием данных по изотопии кислорода (O^{18}) и водорода (D) / А. В. Кирюхин, М. Тахакаши, А. Ю. Поляков и др. // *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 4-5. С. 54–62.
2. *Кирюхин А.В.* Моделирование эксплуатации участка Дачный Мутновского геотермального месторождения в связи с обеспечением теплоносителем Мутновской ГеоЭС 50 МВт. / А. В. Кирюхин, В. Л. Леонов, И. Б. Словцов и др. // *Вулканология и сейсмология*. 2005. № 5. С. 19–44.
3. *Спектор С.В. и др.* Отчет о результатах работ по объекту «Геологическое доизучение и подсчет эксплуатационных запасов подземных вод Мутновского месторождения парогидротерм (по состоянию на 31.12.2015 г.) / С.В. Спектор, А.В. Платонова, С.С. Принь и др. Москва, 2016.
4. *Kiryukhin, A.V.* High temperature fluid flows in the Mutnovsky hydrothermal system, Kamchatka // *Geothermics*. 1993. Vol. 23 (1). P. 49–64.
5. *Kiryukhin A.* 3-D numerical reservoir simulation with several development scenarios for construction of new Mutnovsky GEO-PP-2: Report in accordance with Agreement between IVS and J-Power of November 7, 2016 / A. Kiryukhin, O. Usacheva 2017. 14 p.
6. *Kiryukhin A.V.* Thermal-permeability structure and recharge conditions of the Mutnovsky high-temperature geothermal field (Kamchatka, Russia) / A.V. Kiryukhin, A.Y. Polyakov, O.O. Usacheva, et. // *Volcanology Geothermal Research*. 2018. Vol. 35. P. 36–55.
7. *Kiryukhin A.* Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations / A. Kiryukhin, E. Chernykh, A. Polyakov, et. // *Geosciences*. 2020. Vol. 10(2). P. 52.
8. Годовые отчёты АО «Геотерм» за 2005-2018 гг.: сайт ПАО «РусГидро» [Электронный ресурс]. 2020. URL: <http://www.geotherm.rushydro.ru/disclosure/annual-reports/> (дата обращения: 02.03.2020).
9. Поддержание располагаемой мощности Мутновской геотермальной электрической станции (МГеоЭС). Комплекс работ по бурению скважин Гео-1Б, Гео-7: сетевое издание «Синапс» [Электронный ресурс]. 2020. URL: <https://synapsenet.ru/zakupki/fz223/31907985090%231--kamchatskij-kraj-podderzhanie-raspolagaemoj-moschnosti-mutnovskoj-geotermalnoj-elektricheskoy-stancii-mgeoes-kompleks-rabot-po-bureniyu-skvazhin-geo1b-geo7> (дата обращения: 02.03.2020).

Paratunka Depression – a superbasin of thermal waters

Larisa A. Vorozheykina

*JSC «Heat of the Earth», Termalny, Kamchatka, Russia
geolotdelkbg@yandex.ru*

Geological and hydrogeological features of the Paratunskaya hydrothermal system, previously identified in the river basin. Paratunka, fully summarized by their predecessors in the book «Hydrothermal Systems and Thermal Fields of Kamchatka» (1976). As of 2003, the reserves of the Paratunskoye field were approved by the State Reserves Committee of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation in the amount of 287 l/s in the category A + B + C₁ + C₂. At the same time, attention was drawn to the limited resources of this field, since the drilling of new wells, additional exploration to a depth of 2500 m (wells 101, 102, 103) did not lead to an increase in reserves (GKZ Protocol No. 874 dated September 26, 2003). The Paratunskoye field is an analogue object for the «closed» Petropavlovskaya area. A comprehensive study of its features remains a prerequisite for long-term planning of the development of the urban agglomeration territory, determining the possibility of using alternative geothermal energy for heat supply to the city. In 2020, the next protection of the reserves of thermal waters of the Paratunskoye field is due, in connection with which an attempt was made to consider its geological and hydrogeological features from a different perspective, different from the basin approach, from the standpoint of the paleocaldera structure – the Paratunskaya depression, identified by its predecessors in the area of the Paratunsky geothermal region [9], in order to get closer to understanding the reasons for the limited geothermal resources of the Paratunskoye field, more fully disclosing its features.

Keywords: fluids, Holocene, rift, caldera, strike-slip, depression, field

Паратунская впадина – superbасейн термальных вод

Л.А. Ворожейкина

АО «Тепло Земли» п. Термальный, Камчатский край, 684035

Геолого-гидрогеологические особенности Паратунской гидротермальной системы, выделенной ранее в бассейне р. Паратунки, в полной мере обобщены предшественниками в книге «Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки» (1976). По состоянию на 2003 г., запасы Паратунского месторождения утверждены ГКЗ МПР РФ в объёме 287 л/с по категории А+В+С₁+С₂. При этом обращено внимание на ограниченность ресурсов этого месторождения, поскольку бурение новых скважин, доизучение на глубину 2500 м (скв. 101, 102, 103) не привели к приросту запасов (Протокол ГКЗ № 874 от 26.09.2003 г.).

Паратунское месторождение является объектом-аналогом для «закрытой» Петропавловской площади. Всестороннее изучение его особенностей остаётся необходимым условием для *перспективного планирования* развития территории городской агломерации, определения возможности использования для теплоснабжения города альтернативной геотермальной энергии. В 2020 г. предстоит очередная защита запасов термальных вод Паратунского месторождения, в связи с чем предпринята попытка рассмотреть его геолого-гидрогеологические особенности в ином ракурсе, отличном от бассейнового подхода, – с позиции *палеокальдерной* структуры – Паратунской впадины, выделенной предшественниками на площади Паратунского геотермального района [9], с целью приблизиться к пониманию причины ограниченности геотермальных ресурсов Паратунского месторождения, более полно раскрытия его особенностей.

Ключевые слова: гидротермы, голоцен, рифт, кальдера, сдвиг, впадина, месторождение

В схеме структурно-формационного районирования Петропавловской площади Паратунское месторождение находится в зоне интерференции Южно-Быстринской и Авачинской ВТС (Апрелков, Лебедев, 1986), тяготеет к СВ окраине крупной Карымчинской депрессии [9].

На геолого-тектонической схеме Паратунского геотермального района предшественниками выделена Паратунская впадина, объединившая характерные черты Карымчинской и Начикинской структурных зон (рис. 1).

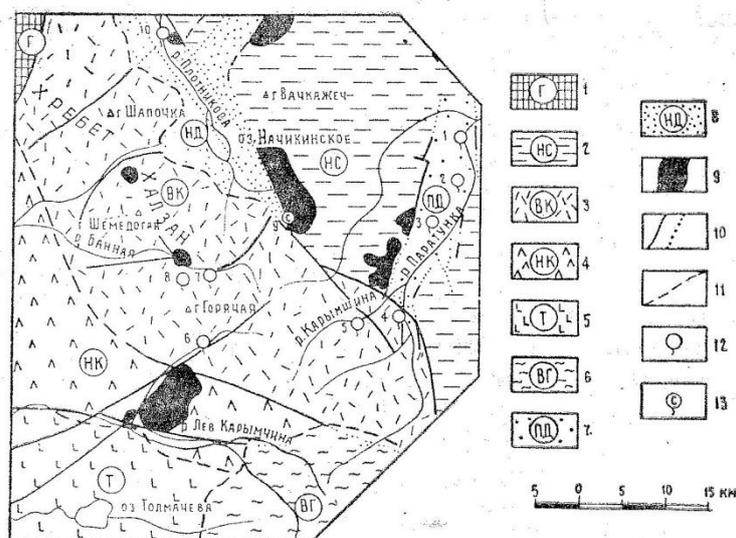


Рисунок 1 – Геолого-тектоническая схема Паратунского геотермального района

1 – Метаморфическая зона Ганальского хребта; 2 – Начикинская складчато-глыбовая зона; 3 – Верхнекарымчинская вулканическая зона; 4 – Нижнекарымчинская вулканическая зона; 5 – Толмачевская область ареального базальтового вулканизма; 6 – северная окраина вулкана Горелого; 7 – Паратунская депрессия; 8 – Начикинская депрессия; 9 – наиболее крупные интрузии; 10 – важнейшие разрывные нарушения; 11 – границы структурных зон; 12 – современные гидротермы; 13 – разгрузка минеральных холодных вод. Источники: 1 – Северно-Паратунские; 2 – Нижнепаратунские; 3 – Среднепаратунские; 4 – Верхнепаратунские; 5 – Карымшинские; 6 – Карымчинские; 7 – Большебанные; 8 – Малые Банные; 9 – разгрузка углекислых сульфатных вод ручья Начикинского; 10 – Начикинские

По аналогии с Верхне-Карымчинской вулканической зоной эта впадина сопоставима со структурой палеокальдеры, днище которой оконтурено дуговыми разломами рр. Паратунка, Лев. Быстрая, смыкающимися южнее соп. Горячей и в приустьевой зоне р. Быстрой, где «горячий» Паратунский грабен разворачивается к вулканам Авачинский, Корякский (Костенко, 1989); граничит с Паратунско-Налычевской депрессией, выделенной В.А. Соколовым [7]. В пределах площади депрессии преобладает СВ ориентировка структур, подобно линиям *Вадати-Заварицкого-Беньоффе*, контролирующим ряды действующих вулканов в зоне растяжения.

В 1937 г. А.Н. Заварицкий соединил линиями вулканические ряды восточного побережья, подчеркнув связь вулканов с определёнными геологическими структурами, которые он не отождествлял с разломами, а считал *растянутыми* участками земной коры. В 1965 г. Г.С. Штейнберг (1965 г.) обратил внимание на совпадение линий Заварицкого с зонами высоких градиентов силы тяжести (4-6 мгл/км). При этом в гравитационном поле нашли отражение только линии, соединяющие однотипные, близкие по возрасту вулканы, в том числе и неотмеченные А.Н. Заварицким, – а именно, линии между вулканами Вилючик – Мутновский, Авачинский – Жупановский.

И.В. Мелекесцев (1965) отметил, что все наиболее крупные вулканы верхнеплейстоцен-голоценового возраста приурочены к единой полосе, вытянутой на 500 км вдоль восточного вулканического пояса. Ширина этой полосы составляет 15-20 км, – высказано предположение, что ось вулканической зоны совпадает с региональным *глубинным* разломом, сделавшим земную кору проницаемой для вещества мантии на большом протяжении [12].

Крупные центры новейшего вулканизма представлены вулканами Шивелуч, Ключевской, Кроноцкий, Жупановский; Авачинский, Корякский, Вилючинский,

Мутновский. Не исключено, что поперечная ЗСЗ структура цепи вулканов, типа Авачинского ряда, обусловлена преобладающим СЗ направлением осевой линии Тихоокеанского огненного кольца.

С общим СЗ направлением глубинного разлома сопряжена Авачинская губа, в акватории которой выявлен узел *сейсмогенной активности*, – на пересечении СВ и СЗ зон разломов (Дмитриев, Ежов, 1977). Подобные диагональные зоны разломов отнесены к наиболее активным в голоценовое время (Федоренко, 1968) [19]. Общая форма узла сейсмогенной активности субширотная, подобно ориентировке зон асейсмических разломов, контролирующих гипоцентры землетрясений, проявленных в данном районе на глубине ≥ 100 км (Кожурин, 1986). Активные субширотные зоны контролируются на водоразделе растущего хр. Тополового незарастающими участками леса. Вблизи побережья Авачинской губы находится влк. Хлебалкина, расположенный на одноимённом острове у г. Вилучинска. Возможно это фрагмент Восточной зоны вулканизма, вдоль западного подножия которой прослеживается открытая трещинная зона [16], контролирующая вновь формирующуюся новую трассу Камчатского рифта [20].

По результатам дешифрирования КС в тепловом диапазоне частот современная *геодинамическая система* региона представлена фрагментами формирующегося Центрального рифта – рифтовыми долинами-грабенами, трансформными сдвигами. Палеогеодинамическая система частично реанимирована в современной тектонике (рис 2).



Рисунок 2 – Палео- и современные геодинамические системы Авачинско-Плотниковского сегмента по результатам дешифрирования КС масштаба 1:1000000 - по И.К. Рундквист, 1991 г. [96]

- 1-3 – Современная геодинамическая система (рифт-трансформный сдвиг – зоны надвигов и отседания): 1- рифтовые долины – грабены в зонах растяжения; 2 – трансформные сдвиги; 3 – а) надвиги, б) зоны отседания; 4-5 – Палеогеодинамическая система, частично регенерирования в современной тектонике: 4 – зона Главного Центрально-Камчатского сдвига; 5 – оперяющие сдвиги 2-го порядка; 6 – выступы докембрийских пород; 7 – выступы палеозойских пород; 8 – а) островодужный комплекс (K_2-N), б) гранитоиды; 9 – области четвертичного вулканизма – а) основного, б) кислого; 10 – линии Заварицкого, соединяющие центры вулканических аппаратов (зоны разломов фундамента); 11 – прочие линеаменты; 12 – вулкано-тектонические структуры; 13 – Паратунское месторождение теплоэнергетических вод

Вся территория Паратунского геотермального района соотносится с Центральной зоной вулканизма (Власов, 1972) [8], для которой характерны кальдерные структуры с телескопированными центрами вулканизма [7]. На КС отчётливо видна кальдера Ключевской группы вулканов с крупнейшим вулканом Евразии Ключевским (а.о. 4760 м) в центре. В регионе прослеживается множество разнонаправленных палеократерных структур,

ВТС разных форм и размеров, – не исключено, что именно разновозрастные вулканические палеоструктуры послужили своеобразным каркасом на последнем этапе формирования территории Камчатки в голоцене. Они же могли послужить коллекторами для скопления термальных вод.

Сведения о подземных водах кальдер и палеокальдер Камчатки в литературе практически отсутствуют, но по результатам полевых наблюдений и геофизических исследований они были обобщены Е.А. Вакиным (1972) [8].

При кальдерообразовании происходит перестройка гидрогеологической обстановки на довольно обширной территории. Дробление пород при взрывах и блоковом проседании увеличивает трещинную проницаемость и создаёт условия для вертикального движения вод и магматических эксгаляций. Крупные блоки пород с относительно хорошей водопроницаемостью погружаются в своеобразный цилиндрический сосуд из пород нижележащего структурного этажа. В результате в кальдерах возникают сложные водоносные системы, состоящие из гидравлически связанных между собой бассейнов грунтовых вод, артезианских горизонтов и трещинных вод тектонических разломов. Разгрузка верхних горизонтов может происходить через кольцевой вал – останец древнего вулкана или подстилающие отложения. Воды глубинных частей кальдер могут дренироваться разрывными нарушениями, но даже при наличии дрен, эти части кальдер из-за своего гипсометрического положения, характеризуются *замедленным* режимом циркуляции.

Глубинные части кальдер являются идеальными структурами для формирования бассейнов и инфильтрационных трещинных систем термальных вод. Здесь налицо относительно изолированные массивы водопроницаемых пород и режим замедленного водообмена. Верхние горизонты системы характеризуются *активным* водообменом подземных вод.

Сам факт образования кальдер и ВТС говорит о наличии в прошлом на относительно малой глубине очага кислых магм, размеры которого сопоставимы с диаметром депрессии. Многие из этих очагов возможно продолжают жить, то есть в них продолжается дифференциация магмы, её кристаллизация и отделение летучих. Инфильтрационные воды по ослабленным зонам поступают на глубину до 7 км в зону теплового и химического воздействия магматического очага.

На территории Паратунского месторождения предполагается наличие двух очагов скрытого вулканизма, – в пределах площади Нижнего и Среднего участков [5]. Возможно им соответствуют очаги *палингенных магм*, наличие которых прослежено на момент превышения водоотбора относительно утверждённых запасов на востоке месторождения. Оно проявилось в повышении показаний силикатного геотермометра (Tsi) на 10 °С, от 100 до 110 °С по всей площади месторождения. Это явление наблюдалось по скважинам месторождения в 2014 г. (ранее было отмечено в 2006 г. при интенсивной насосной эксплуатации скважин Промежуточного участка).

Паратунская впадина (палеократер), ориентирована субпараллельно Планетарному разлому у восточных берегов Камчатки (Уткин, 1989). Как уже упоминалось ранее, днище впадины оконтурено дуговыми разломами сближенных грабенообразных долин рр. Паратунка, Лев. Быстрая, сформированных в зонах отседания (Рундквист, 1991). Обращает внимание асимметричность этих долин, с уклоном к востоку, что предопределило восточное направление регионального стока подземных вод, к Тихому океану. В современном *позднеорогенном* рельефе Паратунская впадина оконтурена блоковыми поднятиями хребтов Быстринский, Приморский, смыкающимися на юге в районе соп. Горячей, на севере – у границы Паратунско-Налычевской депрессии [7].

По центру Паратунской впадины возвышается *растущий* хр. Тополовый – с трансформными сдвигами в зоне растяжения, горстом Тополовым, интрузией г. Зайкин Мыс, Паратунско-Левобыстринской палеоструктурой ВТС, штокообразным телом внедрения (Сидоров, 1995) [7]; с Паратунско-Пиначевской сейсмогенной зоной разуплотнения (Рундквист, 1989) и палеократером ВТС, проявленным у подножия хр. Тополового. Кроме того, на склоне хр. Тополового прослежена рульная аномалия [21].

В перечне геотермальных объектов Паратунской впадины находятся: разведанные Паратунское и Верхне-Паратунское месторождения; 10 групп термальных источников (Северные, Нижние, Средние, Верхне-Паратунские, Карымшинские, Поперечные, Овражки, Верхне-Карымшинские, Бархатные, Сивкины), а также перспективная для поисков закрытая Левобыстринская площадь.

Долины рр. Быстрой,левой Быстрой субпараллельны, разделены хр. Быстринским. Истоки рек Паратунка, Быстрая, Левая Быстрая сосредоточены у восточной кромки Карымчинской впадины, в районе г. Толстый Мыс. Грабенообразные долины вышеперечисленных рек субпараллельны, – возможно вся территория Южно-Быстринской ВТС перспективна для поисков скрытой разгрузки терм, – она ассоциирует с представлением о сближенных палеокальдерных структурах, каждая из которой подобна Паратунской впадине. Особенности строения Паратунского месторождения, прежде всего, обусловлены разделением его территории на 2 части рифтовой зоной глубоко проникающего Центрального разлома (рис. 3), имеющего разнонаправленный сместитель (Серёжников, Зимин, 1976)

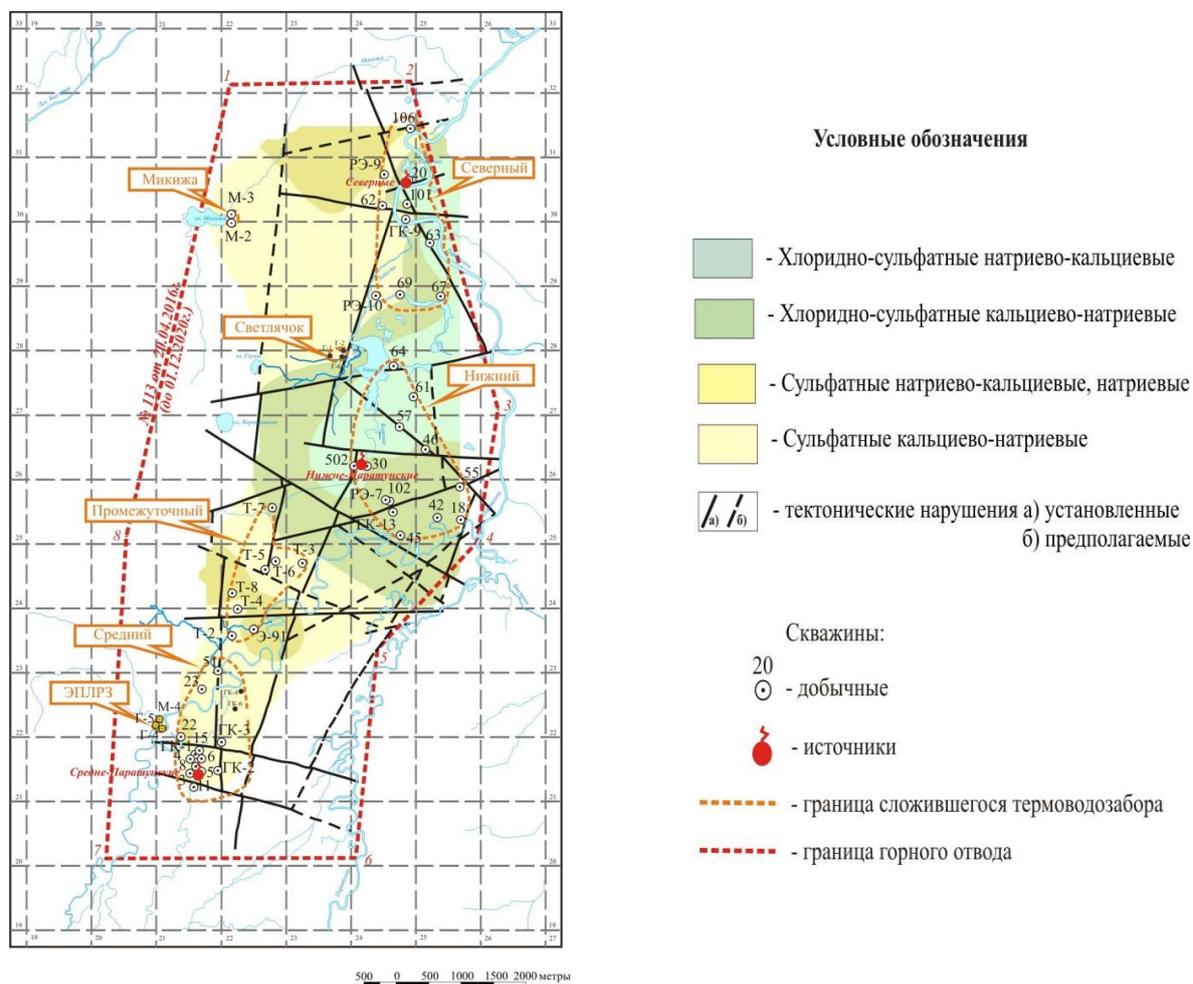


Рисунок 3 – Геолого-гидрогеологическая схема Паратунского месторождения

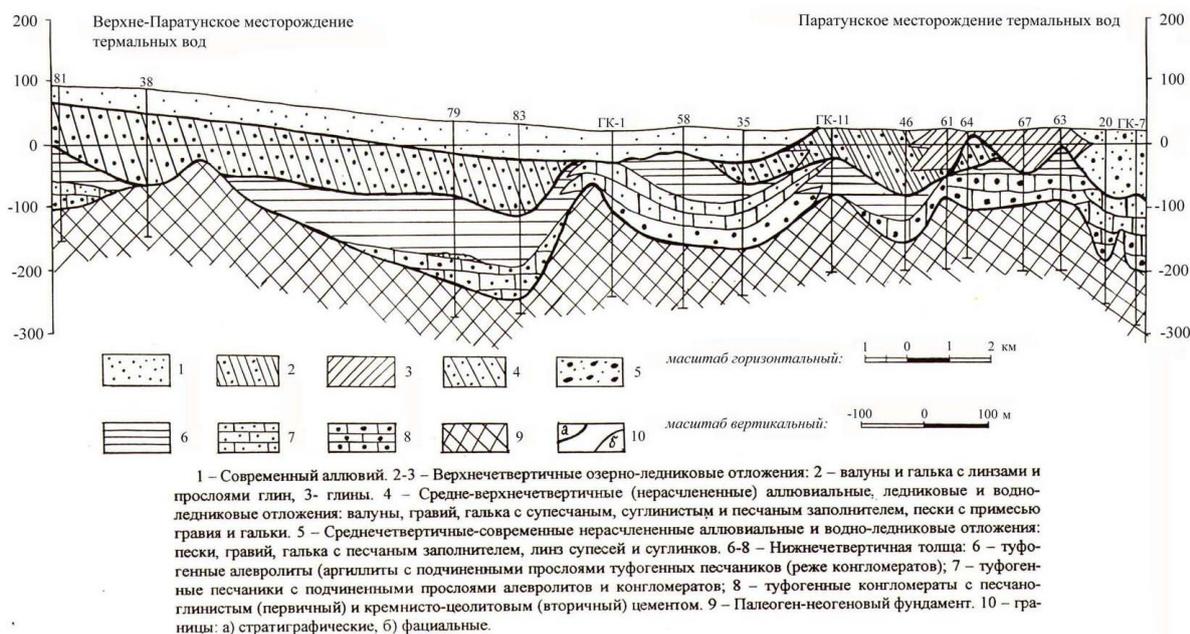
К восточному флангу месторождения относятся участки Северный, Нижний. Остальные 4 участка – Микижа, Сетлячок, Промежуточный, Средний, расположены к западу от Центрального разлома, в пределах площади Паратунско-Пиначевской сейсмогенной зоны разуплотнения (Рундквист, 1991); здесь же разлом Западный, объединил 70-градусную термоаномалию участков Средний и Промежуточный.

Восточный фланг месторождения испытывает влияние подземных вод Южнобережной площади, Паратунско-Авачинской впадины. На термы западной части месторождения могут влиять термальные воды Паратунско-Нальчевской депрессии (наблюдалось увеличение содержания В, As в отдельных скважинах Паратунского месторождения).

Геотермическая обстановка на Паратунском месторождении характеризуется крайней степенью неоднородности: высокоградиентные участки сменяются малоградиентными, положительные аномалии отрицательными, безградиентные зоны перетоков площадками калориметрического смешивания. Передача тепла осуществляется преимущественно конвективным способом. Температура нейтрального слоя варьирует от 4,6 (скв. 83) до 12,4 °С (скв. ГК-12). Активное движение гидротерм по трещинным зонам приводит к уменьшению температурных градиентов. В пределах термоаномалий встречаются безградиентные зоны (скв. ГК-4, 73, 84, 55). Резкое увеличение температурных градиентов до 50-70 °С/100 м наблюдается на границе очага разгрузки и нормального температурного поля.

Отрицательные градиенты несут информацию о направлении движения термальных вод в зонах растекания. Подобные участки использованы для определения *возраста* месторождения температурным методом. В скважине ГК-12 установлена *единовременная вертикальная и горизонтальная миграция термальных вод*. Это позволило термограмму ниже 600 м использовать для определения возраста месторождения *методом геотермии*, с допущением мгновенного растекания терм. Расчетный возраст оказался близким к величине 6300-6500 лет. Полученный результат согласуется с аналогичными расчётами по скважинам 83, 31, ГК-5 [17,18]. Одновременно он сопоставим с возрастом крупных гидротермальных систем Камчатки, близким к голоценовому времени [1].

Отсутствие теплового равновесия в системе, присутствие трещин в водоупоре свидетельствует о том, что термовыводящие трещины возникли после образования четвертичных отложений и расчётное значение возраста является вполне реальным приближением (рис. 4).



Примечание. На участках скважин (ГК-11)-63 современный аллювий снят.

Рисунок 4 – Схематический геологический разрез четвертичных отложений Паратунского грабена вдоль р. Паратунки, по В.М. Зимину

Базовые температуры по участкам месторождения определены по силикатному геотермометру, параметры которого для глубоко проникающей трещинной зоны скв. РЭ-7 оказались равными 136 °С. От скважин Нижнего участка прослеживается радиальное снижение базовых температур во всех направлениях. На период ОЭВ 1968 г. относительно Северного, Нижнего, Среднего участков базовые температуры (по T_{Si}) были равными 100-122-112 °С, соответственно, – то есть и в начале ОЭВ относительно базовых температур лидировал Нижний участок. На этом участке наблюдается смещение купола 80-90° температур к ЮВ от очага естественной разгрузки у скважин 502, 503. Широкое площадное

развитие термальных вод и неожиданные вспышки высоких температур до 100-106 °С (скв. ГК-13, 49, 45) объяснены его *молодой структурой* (Манухин, 1976). Этот вывод справедлив для всей площади месторождения, где на общем относительно спокойном геотемпературном фоне наблюдаются «горячие точки» – вспышки локальных температурных аномалий.

Водное питание Паратунского месторождения формируется за счёт инфильтрационных вод обширной площади геотермального района и смежных с ним территорий. По данным многочисленных изотопных анализов установлено, что формирование инфильтрационных вод происходит преимущественно на отметках порядка 1500 м (Кирюхин, 2020). Транзит инфильтрационных вод к месторождению осуществляется по открытым на глубину трещинным зонам раскола, часть из которых прослежена геофизическим методом (Сидоров, 1995) [7].

На топокарте хорошо видно, что дуговую форму продуктивной площади месторождения повторяют многие элементы рельефа, в том числе линия водораздела горста Тополового, контур расположения термальных источников, схема расположения озёр у подножия хр. Тополового (рис. 5).

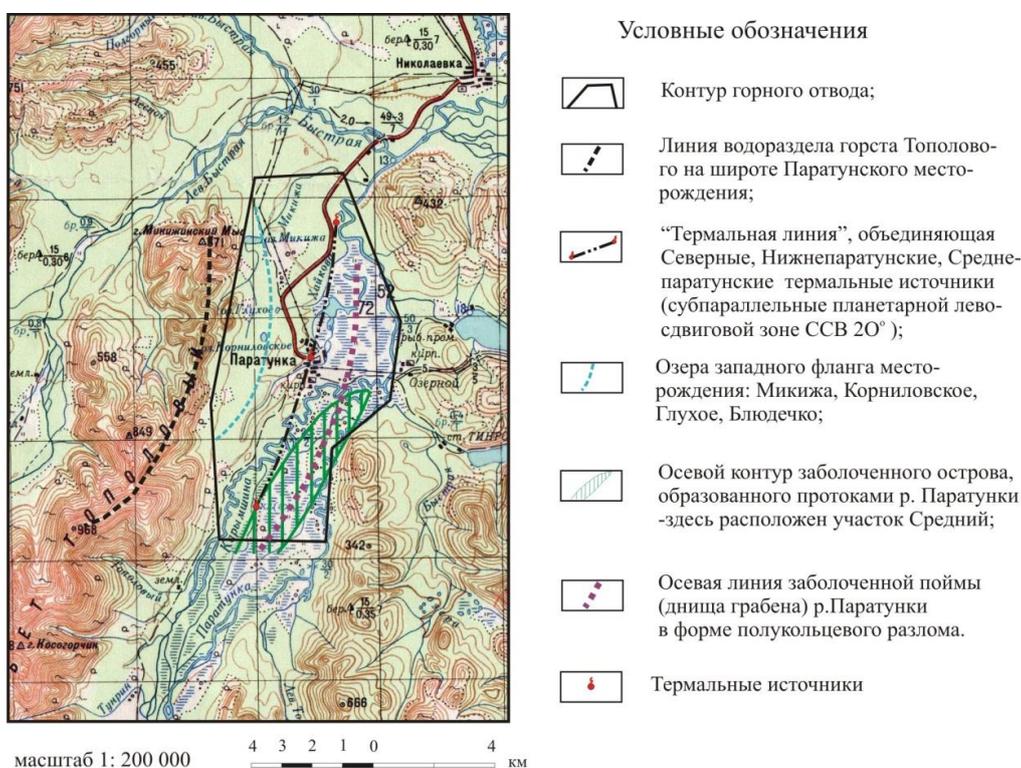


Рисунок 5 – Некоторые элементы структурного контроля

Вышеупомянутый дуговой разлом зеркально отражён на территории долины р.левой Быстрой, тем самым оправдана аналогия соседних геотермальных объектов – Паратунского месторождения и перспективной Левобыстринской площади. Если рассматривать дуговые разломы двух соседних речных долин совместно, – то видна форма удлинённого овала, предположительно соответствующая площади палеократера Паратунско-Быстринской палеоструктуры ВТС [13].

Возникновение *посткальдерного вулканизма* на границе палеократера вполне ожидаемо и это приближает к пониманию возможной схемы формирования термальных источников Камчатки, – в результате процесса посткальдерного вулканизма у границы вулканических структур. В процессе анализа новейшей структурно-геоморфологической обстановки района особое внимание обращено на чёткую приуроченность Паратунских терм к позднеорогенной структуре региона и их сопряжение с субширотными зонами разломов [13].

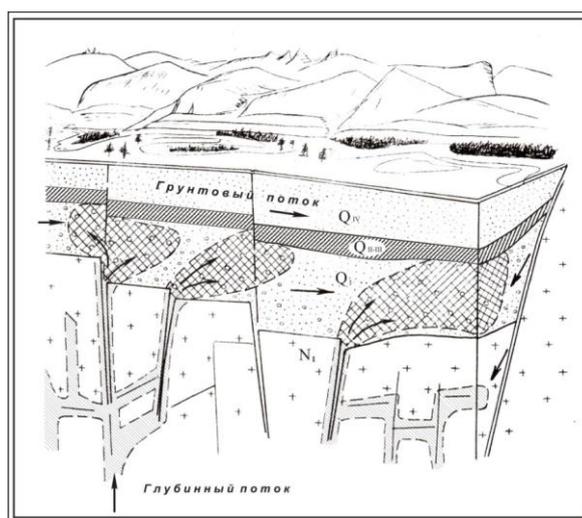
Гидрогеологическая стратификация Паратунского месторождения.

По результатам разведочного бурения до глубины 1000-1500 м на Паратунском месторождении выработана следующая схема гидрогеологической стратификации:

- *Аллювиальные песчано-гравийно-галечные отложения* (заклюают мощный поток холодных грунтовых вод).
- *Нижнечетвертичные алевриты с прослоями тонкозернистых песчаников* (являются водо – и теплоупором) – залегают на глубине 40-180 м, их мощность варьирует в пределах 10-150 м.
- *Нижнечетвертичные конгломераты с прослоями алевритов и туфопесчаников* (образуют верхний водоносный горизонт термальных вод).
- *Туфопесчаники, туфоконгломераты и туфы алнейской серии* (распространены только на Северном участке).
- *Туфогенно-пирокластические породы паратунской свиты* (характеризуются наибольшей обводнённостью, являются основными термовмещающими).
- *Интрузивные породы*, (обводнены незначительно, за исключением отдельных тектонических зон).

Четыре последних подразделения объединены в единый напорный *термоводоносный комплекс*. Все они отнесены к *верхнему* этажу гидрогеологического разреза, разделены на два яруса.

Верхний ярус гидрогеологического разреза термального водоносного комплекса представлен проницаемым горизонтом четвертичных конгломератов и гравелитов, залегающим под водоупором мощностью до 150 м. Этот ярус питается за счёт разгрузки в него термальных вод неогенового фундамента и термальных вод конгломератов.



Условные обозначения

- Зоны растекания термальных вод в верхнем ярусе
- Термальные воды в трещинах фундамента (нижнего яруса)
- Относительный водоупор

Рисунок 6 – Соотношение верхнего и нижнего яруса гидрогеологического разреза

Наличие горизонта туфогенных конгломератов является *важной особенностью* Паратунского межгорного артезианского бассейна.

Благодаря высокой пьезопроводности, порядка $4,8 \cdot 10^6$ м/сут этот пласт хорошо проницаемых пород выполняет роль общего водосборного коллектора холодных и термальных вод. Термальные воды, обладая избыточным давлением (до 5,5 ати), изливаясь в пласт-коллектор, отжимают холодные воды и образуют зоны растекания. Наличие пласта конгломератов способствует калориметрическому смешиванию подземных вод; взаимодействию скважин, нивелировке поля давления, одновременно затрудняет поиски термовыводящих трещин в процессе разведки. Увеличение числа скважин больше минимального, обеспечивающего отбор динамических запасов, не приводит к увеличению удельных дебитов больших колодцев, а лишь увеличивает степень взаимодействия скважин. Водообильность зон водопритоков напрямую зависит от раскрытости трещин.

Предшественниками установлено, что наиболее открыты трещинные зоны оперяющие узлы пересечения разломов [19].

Прогнозные ресурсы Паратунского месторождения первоначально были определены по результатам завершения ОЭВ 1970 г. и составили 314,6 л/с. Но на тот момент установившийся режим фильтрации на месторождении достигнут не был, – в результате вышеназванная величина естественных ресурсов была поставлена под сомнение.

На данный момент прогнозные ресурсы месторождения приравнены к расчётному суммарному дебиту, полученному по интегральной зависимости связи дебита с понижением на начальной стадии эксплуатации (до появления дополнительного возмущения за контуром подсчёта эксплуатационных запасов 1969 г.) – они составили **287** л/с (24,8 тыс. м³/сут). По результатам математического моделирования естественного состояния месторождения начальный приток глубинного теплоносителя в резервуар (восходящий поток) оценивается величиной 190 кг/с, T = 80-111 °С (Кирюхин, 2020 г.).

Общие прогнозные ресурсы Паратунского и Верхне-Паратунского месторождений равны **557** л/с (270+287). Взаимодействие этих месторождений не изучено, но *ожидаемо* при совместной эксплуатации, в связи с повышенной геодинамической активностью территории [20], пространственной приуроченностью обоих месторождений к западному склону растущего хр. Тополового, приуроченного к рифтовой зоне и к ЮЗ фрагменту Паратунско-Быстринской палеокальдеры.

Общие прогнозные ресурсы Паратунской впадины (супербассейна термальных вод) равны **700** л/с (270+287+143) – в этом случае учтены ожидаемые ресурсы перспективной Левобыстринской площади, равные 143 л/с. Рекомендуемая глубина бурения скважин 1500 м соответствует зоне наиболее активного водообмена и устойчивой экологической обстановки, по аналогии с разведанным Паратунским месторождением, находящимся в эксплуатации более 55 лет (с 1964 г.).

Выше уже было сказано, что сам факт образования кальдер и ВТС говорит о наличии в прошлом на относительно малой глубине очага (или очагов) кислых магм, размеры которого сопоставимы с диаметром депрессии. Многие из этих очагов возможно продолжают жить, то есть в них продолжается дифференциация магмы, её кристаллизация и отделение летучих. Одновременно инфильтрационные воды по ослабленным зонам поступают на глубину 1-2 (до 7 км), в зону теплового и химического воздействия магматического очага. По имеющимся данным очаги палингенной магмы, характеризуются тем, что за поступлением дополнительных порций тепла не следует повышение их температуры, а имеет место прогрев обширной площади месторождения [4].

Группы наиболее продуктивных скважин месторождения (термоаномалии) сосредоточены вблизи термальных источников на территории днища грабена р. Паратунки. При этом самые продуктивные из них, судя по результатам дешифрирования АФС (В.А. Соколов, 1995) [7], контролируются пересечением днища грабена р. Паратунки с зонами раскола СВ 50°.

Естественная разгрузка термальных источников (Северных, Нижних, Средних) контролируется пересечением диагональных и дугового разломов; позднеорогенным рельефом, присутствием субширотных разломов и тел внедрения на площади Паратунско-Быстринской ВТС. Выходы источников сопряжены с близкорасположенными субширотными зонами разломов. По результатам геолого-геодинамического анализа (Соколов, 1995) [7] СЗ зоны нарушений относятся к термоподводящим, СВ – к термоконтролирующим.

Паратунское месторождение считается наиболее изученным на Камчатке. Однако, со временем открываются всё новые его особенности. Ниже, вкратце перечислены некоторые из них:

– Месторождение молодо, находится на этапе формирования, приурочено к геодинамически и вулканически активной территории. Голоценовое время его образования сопоставимо с крупными гидротермальными системами Камчатки.

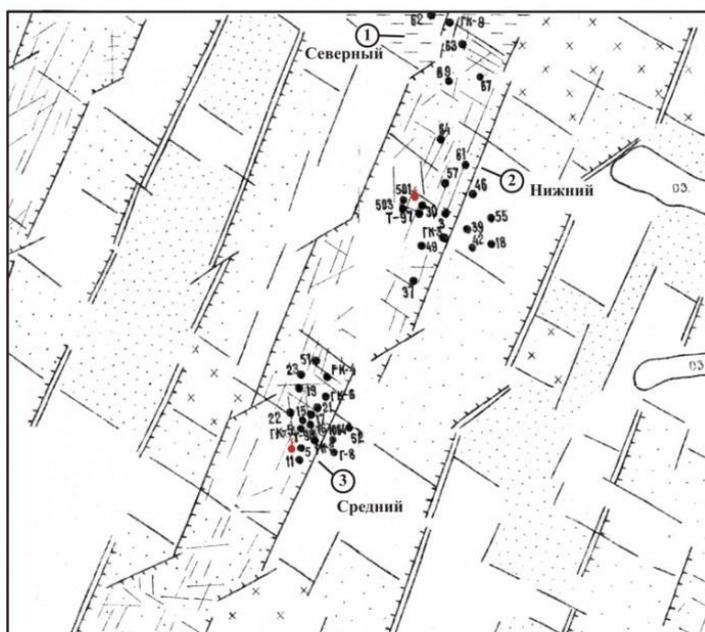


Рисунок 7 – Схема расположения продуктивных скважин на основных участках Паратунского (ПО материалам дешифрирования АФС В.А. Соколовым, 1995)

– Палингенный магматический очаг, расположенный в пределах зоны Центрального рифта на территории Нижнего участка месторождения регулирует процесс теплового баланса западной и восточной флангов месторождения. Дисбаланс теплового равновесия системы сопровождался поступление дополнительных порций тепла с западного фланга месторождения, предположительно со стороны дайки горста Тополового.

– По территории месторождения проходит вновь формирующаяся трасса Камчатского рифта, в виде открытой на глубину трещинной зоны у западного подножия Восточного вулканического пояса. При определённых условиях она может послужить ориентиром для заложения нового линейного трещинного вулкана. Отсюда – необходимость регулярных наблюдений за напряжённостью теплового поля, показаниями гидрохимических геотермометров скважин.

– Глубина скважин 1500 м обозначена как оптимальная, обоснована многолетним опытом эксплуатации в условиях экологической безопасности; наличием в этом интервале наиболее активной зоны водообмена подземных вод; отсутствием значимой обводнённости трещин в интервале 2000-2500 м. Глубже предполагается переход к зоне затруднённого водообмена и, как следствие, наличие захоронённых морских вод (подобных рассолу вскрытому скв. 105 у оз. Тихого в районе с. Николаевка). Скважиной 8 на границе с Южнобережной площадью вскрыты воды с $M \geq 11 \text{ г/дм}^3$.

– Базовые температуры по основным участкам месторождения на период ОЭВ приняты равными 100-122-112 °С по Северному – Нижнему – Среднему участкам, соответственно. От участка. Подобное соотношение сохранилось и в процессе длительной эксплуатации месторождения. По состоянию на 2014 г. средние показания силикатного геотермометра по скважине РЭ-7 участка Нижнего составили **136 °С**. на фоне значений 100 и 110 °С на Северном и Среднем участках.

– Взаимодействие Паратунского и Верхне-Паратунского месторождений не изучено, но ожидаемо, ввиду общего термовмещающего коллектора, геодинамически активной территории, прежде всего растущего хр. Тополового, вдоль которого прослежены зоны сдвигов, рифта, а также зоны раскола СВ 50°, субпараллельные осевой линии Курило-Камчатского желоба (секущие относительно площади обоих месторождений). Прогнозные ресурсы обоих месторождений оценены в 557 л/с, но при их совместной работе ожидается поправка, – мы не знаем какая именно, поэтому округлим общие ресурсы пока условно до **500 л/с**.

– На Паратунском месторождении дополнительное питание со стороны смежных площадей наблюдалось со стороны Южнобережной площади, предположительно – со стороны Паратунско-Налычевской депрессии.

– Паратунская впадина далеко не единственная в регионе. На КС можно видеть множество палеовулканических форм разных размеров и ориентировки. Напрашивается предположение, что именно они послужили каркасом в процессе последней перестройки территории Камчатки в голоцене. В ряде случаев они явились коллектором для скопления термальных вод. Нередко предшественники называли их котловинами, хотя суть остаётся прежней.

Возможно на закрытых территориях (типа Корякско-Авачинской депрессии) поиск скрытых термоаномалий полезно вести с учетом наличия подобных «котловин», особенно в зонах растяжения.

Фактически – площадь Паратунского месторождения и окрестностей – это природная лаборатория, Мекка для учёных. Незря В.С. Шеймович [23] предложил создать на Камчатке *центр международного научного туризма*. В этом плане территория Паратунского месторождения заслуживает самого пристального внимания, особенно в плане формирования новой трассы Камчатского рифта и изучения палингенного магматизма.

Очевидно, что на данный момент преувеличивать возможности Паратунского месторождения не время. Возможность увеличения запасов термальных вод просматривается в расширении площади поисков термальных вод на обширной примыкающей к месторождению территории, прежде всего в пределах площади городской агломерации, как наиболее востребованной и перспективной. Общие запасы термальных вод оценены для городской площади методом аналогии в 1400-1450 л/с.

Подобным работам должна предшествовать соответствующая программа, утверждённая на региональном и федеральном уровнях работ, утверждённая на региональном и государственном уровнях.

Список литературы

1. *Аверьев В.В.* Гидротермальный процесс в вулканических областях и его связь с магматической деятельностью // Современный вулканизм. М.:Наука, 1966.
2. *Асаулова Н.П.* Отчёт о результатах геологоразведочных работ и эксплуатационной разведки на Южнобережном месторождении теплоэнергетических водна период 1982–2010 гг. / Н.П. Асаулова, Л.А. Ворожейкина и др. п. Термальный/ 2010.
3. *Асаулова Н.П.* Техничко-экономическое обоснование кондиций и подсчёт эксплуатационных запасов теплоэнергетических запасов по результатам геологоразведочных работ и опытно-промышленной разработки Нижне-Озерновского месторождения за период 1982-2008 гг. по состоянию на июль 2008 г. / Н.П. Асаулова, Л.А. Ворожейкина и др. п. Термальный. 2009.
4. *Вакин Е.А.* Глубины генерации флюидной составляющей современных гидротерм. // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях / Е.А. Вакин, Ф.Ш. Кутыев М.: Наука, 1979.
5. *Ворожейкина Л.А.* Предполагаемый скрытый вулканизм на Паратунском геотермальном месторождении / Л.А. Ворожейкина, Н.П. Асаулова, Н.В. Обора // Межд. Геотермальная конференция. П-К (Geothermal Volcanology 2018 GEOHEAT 2019) www/igc-geoheat.com.
6. *Ворожейкина Л.А.* Гидротермы и вулканы Камчатки / Л.А. Ворожейкина, Н.В. Обора //Межд. Геотермальная конференция. П-К (GEOHEAT 2018 www/igc-geoheat.com).
7. *Ворожейкина Л.А., Соколов В.А., Сидоров М.Д. и др.* ОМР по применению геологоструктурных, гидрогеологических, геофизических и дистанционных критериев поиска термальных вод на закрытых площадях. Отчёт Авачинской партии.

8. Гидрогеология СССР. Том XXIX. Камчатка, Курильские и Командорские острова. М.: Недра, 1972.
9. Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976.
10. *Дмитриев В.Д.* К вопросу о происхождении Авачинской губы / В.Д. Дмитриев, Б.В. Ежов // Вопросы географии Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 1977. Вып. 7. С. 45–48.
11. *Кононов В.И.* Геохимия термальных вод областей современного вулканизма М. : Наука, 1983. 216 с.
12. Действующие вулканы Камчатки: в 2-х т. М.: Наука, 1991.
13. *Костенко Н.П.* Информационная записка к специальной структурно-геоморфологической карте 1:200 000 м-ба на площади Петропавловского геотермального района. Госстрой РСФСР. Производственный и научно-исследовательский институт по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС). Научно-техническое бюро «Инжгео». М., 1989.
14. *Леонов В.Л.* Карымшина гигантская кальдера-супервулкан на Камчатке. Граница, строение, объём пирокластики / В.Л. Леонов, А.Н. Рогозин // Вулканология и сейсмология. 2007, № 5. С. 14-28
15. *Манухин Ю.Ф.* Гидрогеология Паратунской гидротермальной системы и условия её формирования / Ю.Ф. Манухин, Л.А. Ворожейкина // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1976.
16. *Поляк Б.Г.* Гидротермальные условия вулканического района Камчатки / Б.Г. Поляк, Е.А. Вакин, Е.Н. Овчинникова Петропавловск-Камчатский, 1965.
17. *Непримеров Н.Н.* О научно-исследовательской работе по теме: «Гидродинамические и термические исследования Паратунского месторождения термальных вод» / Н.Н. Непримеров, А.В. Штанин Петропавловск-Камчатский: ТФГИ ДВФО, 1970.
18. *Николаев С.А.* Отчёт № 9 о научно-исследовательской работе по теме: «Гидродинамические и термические исследования Паратунского месторождения термальных вод, 1970 г. Казань: КГУ, 1980.
19. *Паженко Л.Г.* Отчёт о результатах детальной разведки Северного, Нижнего и Среднего участков Паратунского месторождения термальных вод / Л.Г. Паженко и др. п. Термальный, 1968 г.
20. *Рундквист И.К.* Отчёт по договору №91/104. Составление геодинамической карты на основе космических снимков на лист N-57-XXVII / И.К. Рундквист, З.Б. Декусар и др. СПб, 1991.
21. *Серёжников А.И.* Отчёт о результатах гидрогеологического доизучения с инженерно-геологическими, экологическими исследованиями и картографированием м-ба 1:200 000 на территории листа N-57- XXVII в 1991-1996 гг. / А.И. Серёжников, В.А. Лазарев и др. Елизово, 2000.
22. *Уткин В.П.* Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование М: Недра, 1989.
23. *Шеймович В.С.* Государственная геологическая карта РФ. М-б 1:200000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57- XXVII, N-57-XXVIII). Объяснительная записка. М., 2000.
24. Kiryukhin A. V., Vorozheikina L. A., Voronin P. O., Kiryukhin P. A. Thermal-Permeability structure and recharge conditions of the low temperature Paratunsky geothermal reservoirs, Kamchatka, Russia. Geothermics. 2017. Vol. 70. P. 47–61.
25. Kiryukhin A. V., Yampolsky V. A. Modeling study of the Pauzhetsky geothermal field, Kamchatka, Russia. Geothermics. 2004. No. 33. P. 421–442.

Geothermal energy production and heat storage potential of Frederikshavn formation

Kianoosh Moeini¹, Wei Yan², William G. Harrar³

¹Well Optimization team, Hess Corporation, Copenhagen, Denmark
kmoeni@hess.com

²Department of chemical and biochemical engineering, Technical University of Denmark (DTU), Lyngby, Denmark
weya@kemi.dtu.dk

³Ross Offshore, Copenhagen, Denmark
william.harrar@rossoffshore.dk

In the current study, the technical and economic possibility of geothermal heat production and storage in Frederikshavn formation has been studied. The results show the areas with the greatest technical potential and economic possibility in the Frederikshavn formation for heat production and storage mainly aimed for district heating purposes.

Keywords: Geothermal Energy, heat production, Frederikshavn formation, Gassum, district heating

Потенциал производства геотермальной энергии и аккумуляции тепла свиты Фредериксхавн

К. Моейни¹, В. Ян², У.Г. Харрар³

¹Команда оптимизации скважин, Хесс Корпорейшн, Копенгаген, Дания

²Кафедра химической и биохимической инженерии, Технический университет Дании, Лунгбю, Дания

³Росс Оффшор, Копенгаген, Дания

В текущем исследовании изучалась техническая и экономическая возможность производства и хранения геотермального тепла в формации Фредериксхавн. Результаты показывают области с наибольшим техническим потенциалом и экономическими возможностями в формации Фредериксхавн для производства и хранения тепла, в основном предназначенных для целей централизованного теплоснабжения.

Ключевые слова: геотермальная энергия, выработка тепла, свита Фредериксхавн, Гассум, районное теплоснабжение

1. Introduction

«Geothermal» by word is consisted of two Greek words including «geo» and «therm», standing for earth and heat respectively. This heat often appears as volcanos, geysers and hot springs on the earth surface. In academic point of view, geothermal is a renewable sort of energy that operates by extracting the heat stored within the inner layers of the earth. With respect the reduction of conventional hydrocarbon-based fuels, using the alternative ways of supplying the global energy demand such as geothermal energy which is exempt from the most common operational constraints including weather condition and seasonal variations, would be a strategic approach.

Denmark with a great interest in clean energy resources has been developing the possibilities of geothermal energy with a significant focus on district heating purposes as a result of lower reservoir temperature requirements. The areas that have the most appropriate geothermal potential in Denmark are mainly located in Frederikshavn, Gassum and Haldager formations in Jutland area. In the current study, the technical and economic possibility of geothermal heat production and storage in Frederikshavn formation has been studied.

The results show the areas with the greatest technical potential and economic possibility in the Frederikshavn formation for heat production and storage mainly aimed for district heating

purposes. A sensitivity analysis was implemented that illustrated the great importance of the key technical parameters including reservoir depth, production rate and correspondingly reservoir temperature on heat production and storage. The stated parameters have depicted a considerable influence on the economic feasibility analysis of the chosen locations.

2. Simulation Results

In the technical section of the thesis, an investigation has been made considering the currently existing wells in the area of the interest; in which, the detailed geological and reservoir characteristics such as porosity, permeability, temperature, reservoir depth, lithology of the formation, existing of faults and so on have been analyzed. In order to have a descriptive analysis of the quality of the reservoirs in heat storage and production, and the possibility of heat transfer from adjacent formations (Gassum and Haldager) to Frederikshavn formation, the stimulation period has been opted as 30 years. Heat production and storage has been considered through a seasonal cycle; through which, during the cold season (considered as the first half of year) cool water with surface temperature (considered as approximately 10 °C) will be injected to the reservoir and then after a shut in period of 15 days, which is implemented for assisting the heat equilibrium in the reservoir, injector and producer will be switched. It must be stated that during the second half of the year, which is known as the hot season (with less heat demand), injection temperature is 60 °C. The simulations have been run for a various depth ranges that cover the shallowest and deepest case scenario of each area of interest.

In the next step, the simulation zones that yielded a proper status with respect to the production rate, were considered for another set of simulations; in which, the distance between production and injection wells have been altered from 500 to 200 meters. The areas fulfilling the technical criteria, which include proper rate of production and fluid temperature were qualified for the next stage of analysis. Based on the policies of Ross offshore, the production rates, which are below 100 cubic meters per hour for non-shallow wells with insufficient produced fluid temperature, are generally not technically and economically considered as plant with appropriate geothermal potential for district heating utilization.

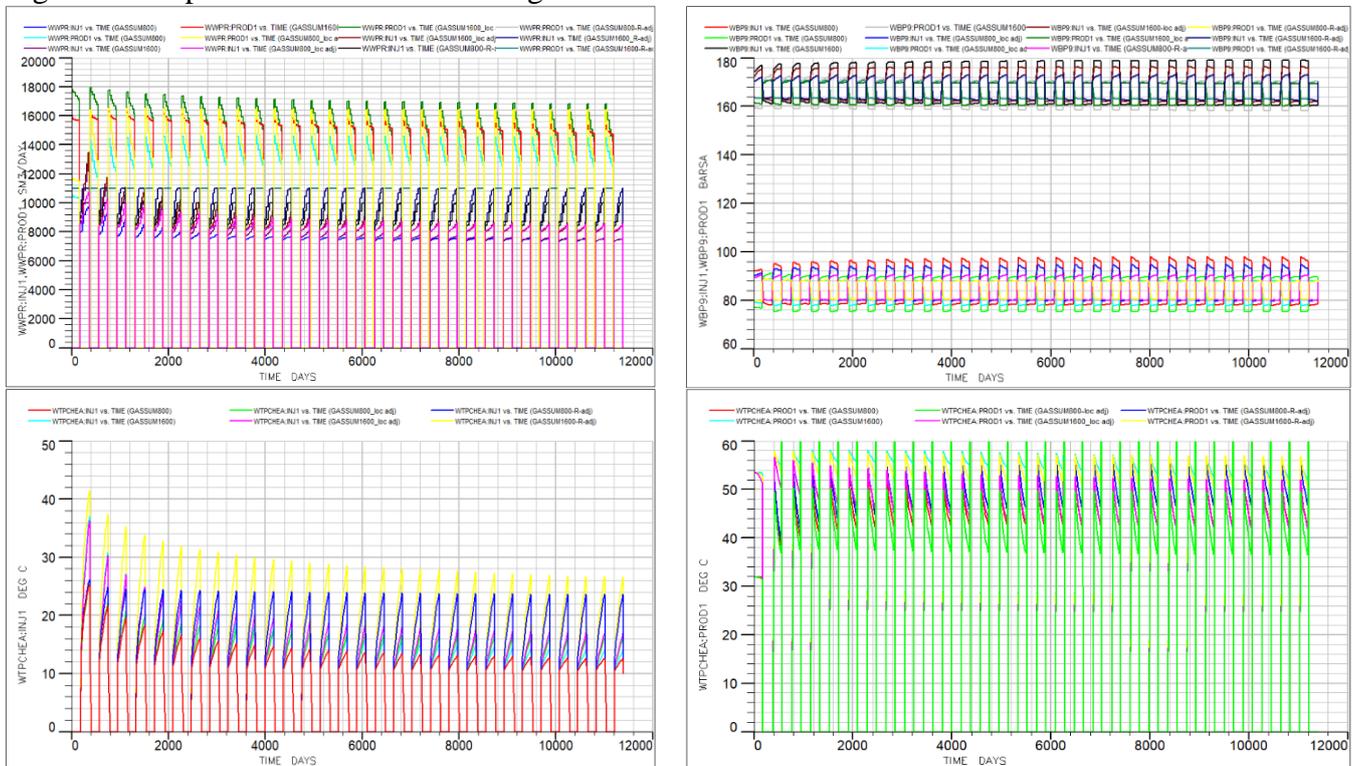


Figure 1 – Plot of production rate and average grid pressure(upper left and right respectively)for the two depth limit sets of Frederikshavn formation(top of 800 and 1600 meters) and the status of temperature for injector and producer wells(bottom left and right picture respectively) in Gassum-1 well (all cases of sensitivity analysis included)

In the next step, the sensitivity analysis has been made for the remaining locations with respect to production rate. Lowering the rate to 70 % of the maximum production rate can decrease the cooling effect and increase the efficiency of heat production and storage. To have a better overview of the implemented analysis, the result of a sample location with the stated sensitivity analysis (adjusting well locations and production rate) has been illustrated in the following (Fig. 1).

2.1 Investigating the heat transfer from underlying formations

In order to investigate the possibility of heat transfer from the adjacent formations (Gassum and Haldager) to Frederikshavn formation, one of the locations with the lowest marginal distance between the cited formations to Frederikshavn formation was opted. The simulation result has been shown in the following.

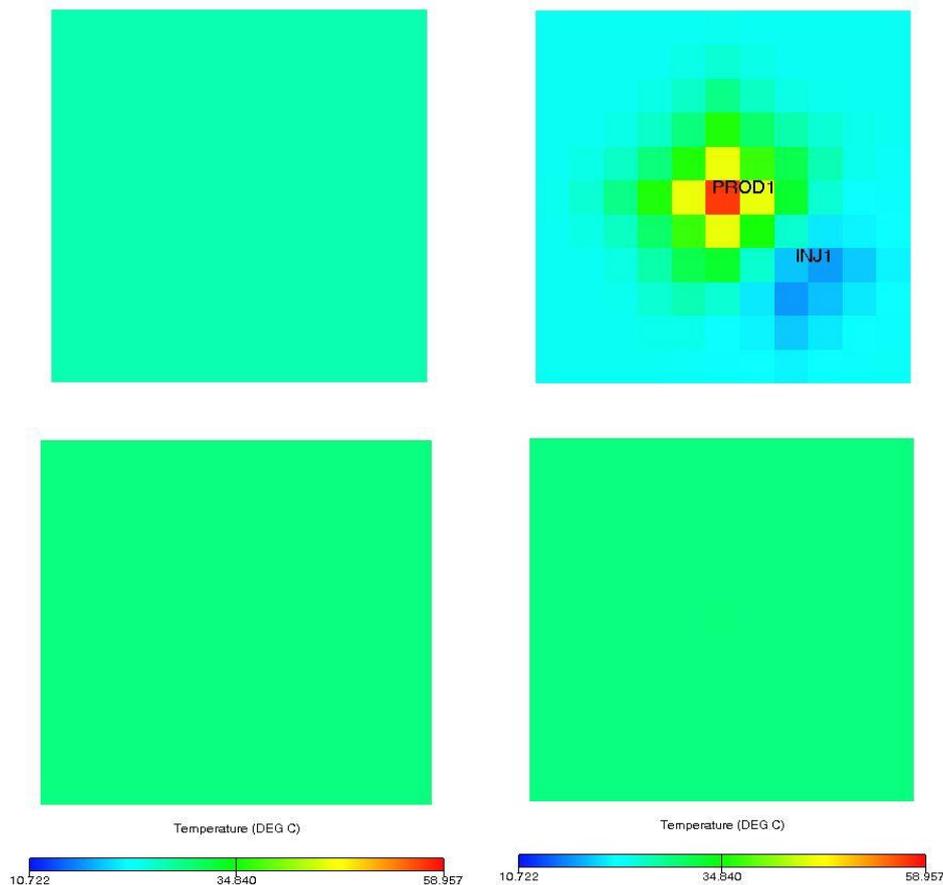


Figure 2 – The time-laps of the simulation for the perforated layer in Frederikshavn and top of Haldager formation (top and bottom pictures) in Sæby well at the beginning and end of simulation (left and right pictures)

As can be seen through Figure 2, the temperature status in the investigated section of Haldager formation (top of formation) has not sensibly changed (merely 0.02 degrees Celsius) during 30 years of simulation, which implies on the fact that due to the existence of shale layers between Frederikshavn and Haldager formation, no sensible heat transfer has occurred.

2.2 Economic perspective

In this section, the economic feasibility of the locations whose technical capabilities were approved through simulation was implemented. The relevant expenses such as drilling and maintenance, surface equipment, crew and so on were provided by Ross offshore company. Through which, the remained locations were sorted based on their economic/technical benefits. The results have been shown in the following.

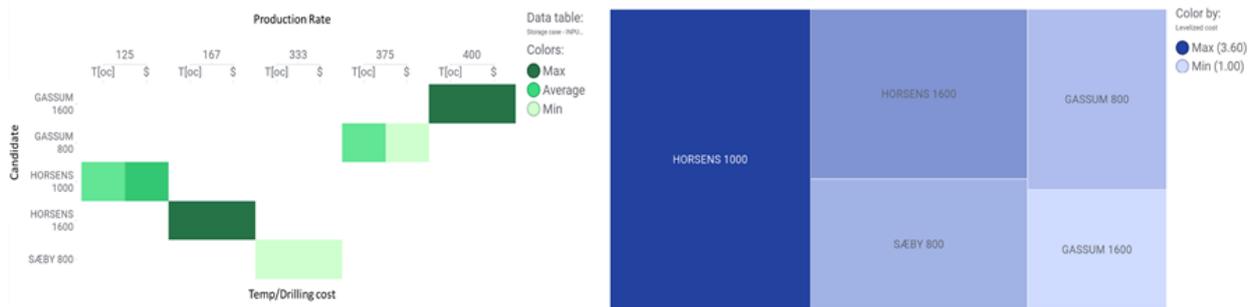


Figure 3 – Visualization of various analysis criteria together with the output result of leveled cost for the investigated candidates

3. Conclusion

Based on the current study, one can state the proper potential of Frederikshavn formation for geothermal based district heating studies. The economic analysis confirmed the imperial feasibility of the locations which were technically approved.

The technical analysis regarding the possibility of heat transfer from the adjacent formations, which are placed in deeper areas (Gassum and Haldager) was not satisfactory due to the very low recorded temperature alteration (merely 0.02 degrees Celsius) of the top of Haldager formation (the formation below Frederikshavn formation).

In terms of heat storage, all of the zones performed properly, which is due to the fact that the injected heat to the reservoir was properly sealed by the overlaying shale layers. In the cases with higher reservoir transmissivity, the cited stored heat was utilized more properly due to the better transmission to the cooled area, which was affected by cold water injection. In other word, the wells; in which, lower temperature difference between the production and storage period was recorded, have higher technical and economic potential to be used for geothermal based district heating plant.

References

1. *T. M. Letcher*, «Future energy: improved, sustainable and clean options for our planet/edited by Trevor M. Letcher,» ed: Amsterdam; London: Elsevier, 2008.
2. *W.-Y. Chen, J. Seiner, T. Suzuki, and M. Lackner*, Handbook of climate change mitigation. Springer, 2012.
3. *M. Dickson and M. Fanelli*, «What is geothermal energy? International geothermal association,» ed, 2004.
4. «Geotermi WebGIS-Portalen-GEUS (<http://data.geus.dk/geoterm/>).»
5. *N. L. H. Lorenzen S.B., Andersen L., Eriksen R.B.*, «Drejebog om geotermi,» *Grøn Energi, GEUS, Ross Engineering, Dansk Fjernvarmes Geotermiselskab*, 2014.
6. GEOELEC, «Training Course on Geothermal Electricity, Potsdam, Germany», 2013.

CHAPTER VI. RELATIONSHIPS AMONG GEOTHERMAL ENERGY, MAGMATISM, METALLOGENY, SECONDARY MINERALIZATION AND PERMEABILITY

РАЗДЕЛ VI. ВЗАИМОСВЯЗЬ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, МАГМАТИЗМА, МЕТАЛЛОГЕНИИ, ВТОРИЧНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ И ПРОНИЦАЕМОСТИ

УДК 550.36:551.21

Fluid Infiltration and Permeability Evolution by Crustal Fracturing during High Grade Metamorphism

Diana Mindaleva, Masaoki Uno, Atsushi Okamoto and Noriyoshi Tsuchiya

*6-6-20 Aza-Aoba, Aramaki, Aobaku, Sendai, Japan 980-8579
diana@geo.kankyotohoku.ac.jp*

Fluid flow in the crust play an essential role in mass and heat transport, enhances hydration reactions, modifies mechanical and rheological properties of rocks, and important for the ore deposit formation, crustal deformation, and earthquake triggering. Increase of fluid pressure in the crust provides fracturing. Created fractures become new fluid pathways and promote fluid infiltration in the crust. Permeability evolution from low-permeable media to the high-permeable fractured crust is essential condition allowing fluid infiltration. Recent geophysical observations have revealed a relationship between fluid infiltration and tremors and slow slip events (e.g., Obara, 2002; Shelly et al., 2006). The periodic seismic cycles are explained by the accumulation of fluids, followed by an increase in fluid pressure, and subsequent fracturing. The recurrent fluid pressure increases and seismic events at the plate interface may be controlled by the permeability of the overlying crust (Nakajima and Uchida, 2018).

However, there are lack of detailed fluid fluxes estimations and permeability evolutions models. To understand short, dynamic fluid processes it is necessary to constrain fluid volume transported within the crust and permeability evolution allowing large amount of fluids to be transported to shallow parts. In this work we describe first trial to estimate permeability evolution based on metamorphic processes associated with crustal fractures and developed quantitative fluid infiltration model incorporating general relationships between mineral reactions, fluid flow and element mobilization during fluid–rock interaction. We also calculated fluid fluxes through the reaction zones and via fractures. Results suggest that much amount of fluids was transported via the fractures, and less through the hydrous reaction zones.

Keywords: permeability, fluid flux, timescales

Инфильтрация флюидов и эволюция проницаемости при фракинге литосферы в процессе метаморфизма

Диана Миндалева, Масаоки Уно, Ацуши Окамото, Норие́си Цучия

Высшая школа экологических исследований, Университет Тохоку, Сендай, Япония

Флюидный поток в коре играет существенную роль в массовом и тепловом транспорте, усиливает реакцию гидратации, изменяет механические и реологические свойства пород, имеет важное значение для формирования рудных залежей, деформации коры и инициирования землетрясений. Повышение давления флюида в коре обеспечивает трещиноватость. Созданные трещины становятся новыми флюидными путями и способствуют инфильтрации жидкости в кору. Эволюция проницаемости от низкопроницаемой среды к высокопроницаемой трещиноватой коре является существенным условием, обеспечивающим инфильтрацию жидкости. Недавние геофизические наблюдения выявили связь между инфильтрацией флюида и треморами и событиями медленного скольжения (например, Obara, 2002; Shelly et al., 2006). Периодические сейсмические циклы объясняются накоплением флюидов с последующим повышением давления флюидов и последующим гидроразрывом пласта. Периодическое повышение давления флюидов и сейсмические события на границе раздела плит могут контролироваться проницаемостью перекрывающей коры (Nakajima and Uchida, 2018).

Однако отсутствуют детальные оценки потоков флюидов и модели эволюции проницаемости. Для понимания коротких динамических процессов флюидов необходимо ограничить объем флюидов, транспортируемых внутри коры, и эволюцию проницаемости, позволяющую транспортировать большое количество флюидов на мелкие участки. В данной работе мы описываем первое испытание для оценки эволюции проницаемости, основанное на метаморфических процессах, связанных с трещинами земной коры, и разработанную количественную модель инфильтрации флюида, включающую общие взаимосвязи между минеральными реакциями, потоком флюида и мобилизацией элементов во время взаимодействия флюид-порода. Мы также рассчитали потоки жидкости через зоны реакций и через трещины. Результаты показывают, что через трещины транспортировалось большое количество жидкости, и меньшее количество – через реакционные зоны гидроразрывов.

Ключевые слова: проницаемость, поток жидкости, временные рамки

1. Introduction

We investigated fluid-rock reaction zones in hydrated metamorphic rocks samples from the Sør Rondane Mountains (SRM), East Antarctica. Millimetre-scale hydrous reaction zones occur along fractures. Previous studies suggested Cl-bearing fluid infiltration in the SRM. Chlorine concentrations in apatite and amphibole grains show a gradual decrease from the fractures toward the wall rocks. In this work we constrain timescales of fluid infiltration by analysing fluid mobile elemental profiles and applied reactive transport model with local equilibrium. Fitting results suggest that advection with minor diffusion is dominant. Further wall rock and fractured crust permeability was estimated based on the metamorphic processes associated with crustal fractures. Metamorphic fluid-rock reaction zones along fractures provide geological evidence of fluid infiltration and crustal fracturing, and can be used to estimate fluid pressure gradients and permeability changes. To understand these properties, we estimated fluid pressure gradient by thermodynamic modeling. Thermodynamic analyses on the chemical activity of H₂O can constrain fluid pressures during metamorphic reactions (e.g., Goto and Banno, 1990).

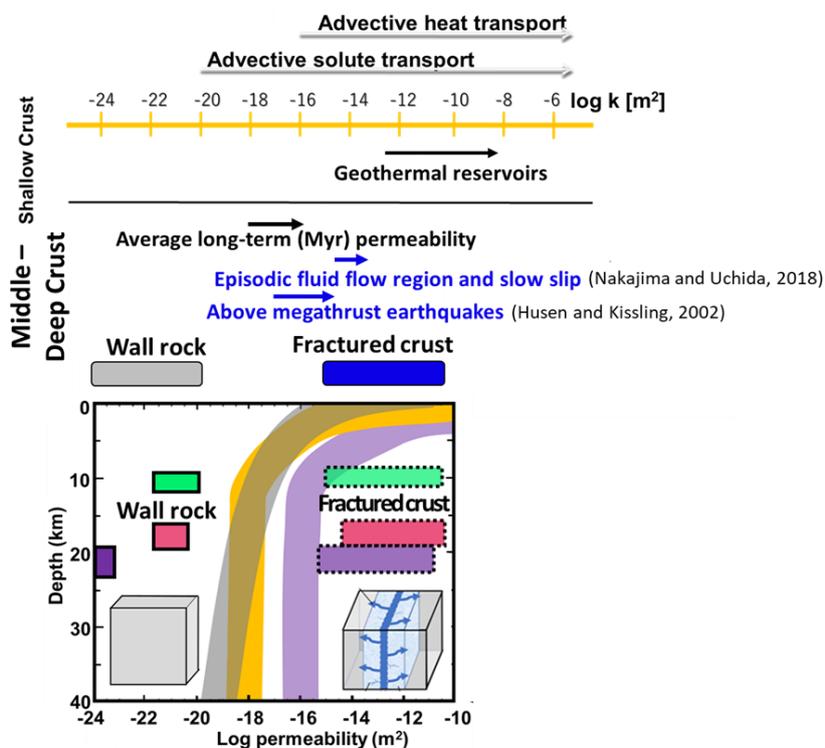


Figure 4 – Permeability evolution in the crust estimated for the wall rocks and fractured crust in comparison with values of geological processes. A comparison between the estimated permeabilities of the host rock and spatio-averaged «fractured crust» in the mafic granulite (pink), opx-hbl schist (green) and opx-hbl gneiss (purple). Curves showing permeability variations with depth are from Manning and Ingebritsen (1999), Ingebritsen and Manning (2002), and Ingebritsen and Manning (2010)

2. Conclusion

We show that the combination of thermodynamic analyses of H₂O activity and reactive transport analyses enables permeability estimation on fluid-rock reaction zones. We proposed fluid infiltration model in the crustal conditions and compared it to geophysical observations (Fig. 1). The timescales of fluid infiltration are constrained to tens of hours. The fluid pressure gradient across the reaction zones was estimated from the H₂O activity to be 0.4–1.4 MPa/mm. The permeability of the wall rock and fractures were estimated to be 10⁻²⁰–10⁻²² and 10⁻⁸–10⁻⁹ m², respectively. Our results show that rapid infiltration of Cl-bearing fluids occurred due to a limited fluid flux. Low permeable wall rock (10⁻²⁰–10⁻²² m²) was fractured due to fluid accumulation and rising of the fluid pressure. The spatio-averaged permeability then significantly increased (10⁻¹⁰–10⁻¹⁶ m²). The contrasting permeability reveals enhancements associated with crustal fracturing on timescales comparable to geophysical observations.

References

1. Nakajima, J. Repeated drainage from megathrusts during episodic slow slip /J. Nakajima, N. Uchida // *Nat. Geosci.* 2018. 11. 351–356, DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0090-z2>.
2. Ingebritsen, S.E. Diffuse fluid flux through orogenic belts: Implications for the world ocean. / S.E. Ingebritsen, C.E. Manning // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2002. 99, P. 9113–9116, DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.132275699>.
3. Ingebritsen, S.E. Permeability of the Continental Crust: Dynamic Variations Inferred from Seismicity and Metamorphism. *Front* / S.E Ingebritsen, C. E. Manning // *Geofluids*. 2010. 193–205, DOI: <https://doi.org/10.1002/9781444394900.ch13>.
4. Manning, C.E. Permeability of the continental crust □ : implication of the geothermal data and metamorphic system / C.E. Manning, S.E. Ingebritsen // *Rev. Geophys.* 1999. 127–150.
5. Goto, A. Hydration of basic granulite to garnet-epidote amphibolite in the Sanbagawa metamorphic belt, central Shikoku, Japan. / A. Goto, S. Banno // *Chem. Geol.* 1990. 85. 247–263, DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90003-P](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90003-P).
6. Obara, K. Nonvolcanic deep tremor associated with subduction in southwest Japan // *Science*. 2002. 296, 1679–1681, DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1070378>.
7. Shelly, D.R. Low-frequency earthquakes in Shikoku, Japan, and their relationship to episodic tremor and slip / D.R. Shelly, G.C. Beroza, S. Ide, S. Nakamura // *Nature*. 2006. 442. 188–191, DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04931>.

CHAPTER VII. PRODUCTION GEOTHERMAL RESERVOIRS AND HARD-TO-RECOVER HYDROCARBON FORMATION CONDITIONS

РАЗДЕЛ VII. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ И МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ С ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫМИ ЗАПАСАМИ

УДК550.8+622.276.6

The Effect of Binary Mixtures on the Reservoir Properties of Terrigenous Rocks

Andrei I. Cheban^{1,2}, Pavel P. Golub², Rodion O. Rykov^{1,2}, Ivan S. Schakhmatov²

¹University of Tyumen, Tyumen, Russia
andre-ch2008@yandex.ru

²CoretestService, Ltd, Tyumen, Russia

One of the modern combined methods of production intensification is the method of thermal-gas-chemical treatment (TGCT) on the bottom-hole formation zone using binary mixtures (BM). The basis of the treatment process is the injection of chemicals: NH_4NO_3 – ammonium nitrate, the energy release component, and NaNO_2 – sodium nitrite, the initiating agent.

A laboratory complex of studies is proposed to identify various effects of the use of binary mixtures on terrigenous rocks.

The laboratory research approach described in this work provides valuable information for various stages of industrial application of this method on target fields. Modeling of TGCT on core samples in thermobaric conditions allows predicting the efficiency of this EOR, the expected effect on the target field. However, a certain amount of additional experiments is required to isolate individual physicochemical effects, determine various technological parameters of the BM composition, injection parameters and possible associated problems, which the proposed set of studies brings closer.

Keywords: binary mixtures, enhanced oil recovery (EOR), core, filtration, permeability, special core analysis (SCAL), swelling ability

Влияние бинарных смесей на ФЕС терригенных пород

А.И. Чебан^{1,2}, П.П. Голуб², Р.О. Рыков^{1,2}, И.С. Шахматов²

¹ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Тюмень, Россия

²ООО «Корэст Сервис», Тюмень, Россия

Один из современных комбинированных методов интенсификации добычи: метод термогазохимического воздействия (ТГХВ) на призабойную зону пласта растворами бинарных смесей (БС). Основой процесса обработки является закачка реагентов: NH_4NO_3 – аммиачной селитры (нитрата аммония), энерговыделяющего компонента и NaNO_2 – нитрита натрия, инициатора реакции.

Предложен лабораторный комплекс исследований для выявления различных эффектов применения бинарных смесей на терригенных породах.

Подход к лабораторным исследованиям, описанный в данной работе, представляет ценную информацию для различных этапов промышленного применения данного метода на целевых месторождениях. Моделирование ТГХВ на керне в термобарических условиях позволяет прогнозировать эффективность данного МУН и ожидаемый эффект на целевом месторождении. Кроме этого, требуется еще определённое количество дополнительных экспериментов для выделения отдельных физико-химических эффектов, определения различных технологических параметров состава БС, параметров закачки и возможных сопряженных проблем, к чему приближает предложенный комплекс исследований.

Ключевые слова: бинарные смеси, методы увеличения нефтеотдачи (МУН), керн, фильтрация, проницаемость, специальные исследования керна, набухаемость

Введение

Основой процесса обработки растворами БС является отдельная закачка реагентов: NH_4NO_3 – аммиачной селитры (нитрата аммония), энерговыделяющего компонента и NaNO_2 – нитрита натрия, инициатора реакции, их смешивание и инициация объемной химической реакции в поровом пространстве. Такой метод закачки реагентов позволяет предотвратить разрушение скважины и скважинного оборудования и увеличить глубину термобарохимического воздействия. (Александров, Кузнецов и др., 2016; Вершинин, Вершинина и др., 2016).

Данная работа посвящена разносторонней оценке эффектов обработки терригенных пород бинарной смесью на основе аммиачной селитры и нитрита натрия. Перед применением метода в промышленных масштабах требуется его детальное изучение в лабораторных условиях. Это вызвано, во-первых, необходимостью отделить возможные эффекты физико-химического воздействия на скелет породы от термогазохимического воздействия, возникающего в результате реакции. Во-вторых, необходимо определить фильтрационные свойства, играющие важную роль в процессе закачки БС и последующей добычи нефти из обработанной скважины.

Для исследований были выбраны коллекторы месторождения терригенного типа, являющиеся более распространенными (около 58% всех коллекторов) и воздействие БС на которые недостаточно изучено.

Лабораторные методы

Исследования по созданию и совершенствованию технологий добычи основываются на широком спектре специальных исследований керна.

Подход, сформированный в лаборатории ООО «Корэст сервис» (Чебан, Голуб и др., 2020) при работе с БС включает следующие этапы: оценка влияния компонентов бинарной смеси на ФЕС пород коллекторов, разработка технологической схемы проведения тестовых экспериментов по ТГХВ на модельном песчанике, моделирование ТГХВ на керне целевого месторождения.

Оценка влияния компонентов бинарной смеси на породу включает в себя определение набухаемости глинистых минералов пород коллекторов при контакте с раствором бинарной смеси, а также эксперименты по влиянию компонентов на фазовую проницаемость. Данный этап также может быть дополнен тестами на совместимость пластовых флюидов с реагентами и продуктами реакции, а также тестами на коррозионную активность.

Эффект набухаемости глин определяется в экспериментах по определению коэффициента набухания бентопорошка или пелитовой фракции породы при воздействии водных растворов аммиачной селитры с различными концентрациями на установке, аналоге прибора Жигача-Ярова (Жигач, Яров, 1959). Набухание может привести к изменению порового пространства, из-за увеличения в размерах глинистых минералов, и, как следствие, уменьшению проницаемости.

Измерение коэффициента проницаемости по водным растворам в пластовых условиях при смене фильтруемой жидкости на установке, моделирующей пластовые условия, «Тех-ОФП» позволяет симитировать закачку растворов аммиачной селитры в водонасыщенные участки пласта и сопряженное с этим изменение проницаемости по пластовой воде.

Определение коэффициента восстановления проницаемости по нефти в пластовых условиях на установке имитирует закачку раствора в нефтенасыщенные участки пласта с остаточным содержанием пластовой воды. Результаты сравниваются с аналогичной закачкой пластовой воды.

Финальное моделирование закачки БС проводится на модернизированном испытательном стенде в термобарических условиях в соответствии с фактическими условиями на целевом месторождении. Отбор, подготовка и определение базовых величин образцов проводится в соответствии с ГОСТ 26450.0-2-85 и ОСТ 39-195-86.

Дополнительно выполняется рентгеновская томография образцов до и после воздействия, для определения структурных изменений в поровом пространстве.

Результаты

За время исследований было выполнено по 3-5 испытаний на набухаемость для каждой из концентраций аммиачной селитры. Время одного испытания ограничивалось ~24 часами, так как после тестовых экспериментов было установлено, что основные процессы набухания происходят в первые ~16 часов.

Для сравнения также были выполнены опыты с использованием дистиллированной воды и пластовой. При использовании дистиллированной воды процесс стабилизации объема пробы занимает значительно большее время, не менее 50 часов. Затем полученные данные усреднялись по коэффициенту набухания.

С увеличением минерализации водного раствора нитрата аммония имеется тенденция к снижению коэффициента набухания горных пород, содержащих глинистые составляющие. Коэффициент набухаемости для высоко минерализованных растворов нитрата аммония в 1,5-2 раза меньше, чем для пластовой ($K_{\text{наб.отн.}} = 0,56-0,58$) и дистиллированной воды ($K_{\text{наб.отн.}} = 0,42-0,43$).

Проницаемость при смене фильтруемой воды в пластовых условиях испытывалась на двух цилиндрических образцах горной породы, при этом в каждом эксперименте создавали термобарические условия, приближенные к пластовым. Образцы исследовались при смене фильтруемых жидкостей в следующем порядке по стадиям:

- 1) Модель пластовой воды;
- 2) Раствор нитрата аммония с массовой концентрацией 40 %;
- 3) Модель пластовой воды;
- 4) Раствор нитрата аммония с массовой концентрацией 50 %;
- 5) Модель пластовой воды;
- 6) Раствор нитрата аммония с массовой концентрацией 66 %;
- 7) Модель пластовой воды.

Определение коэффициента восстановления проницаемости по нефти после вытеснения исследуемым раствором производили на двух образцах. Эксперимент выполнялся в следующей последовательности стадий:

- 1) Определение проницаемости по нефти при остаточной воде.
- 2) Вытеснение нефти раствором (аммиачной селитры/модели пластовой воды) с линейной скоростью $V_{\text{лин}} = 1$ м/с.
- 3) Определение проницаемости по раствору.
- 4) Вытеснение раствора нефтью с линейной скоростью $V_{\text{лин}} = 1$ м/с.
- 5) Определение проницаемости по нефти после воздействия раствора.

При смене фильтруемого флюида достигалась стабилизация по показаниям дифференциального манометра ($\Delta p = \text{const}$) и электрического сопротивления ($R = \text{const}$) на выбранной минимальной скорости в соответствии с методикой. Замер проницаемости производили по достижении стационарного состояния на 3 и более режимах фильтрации.

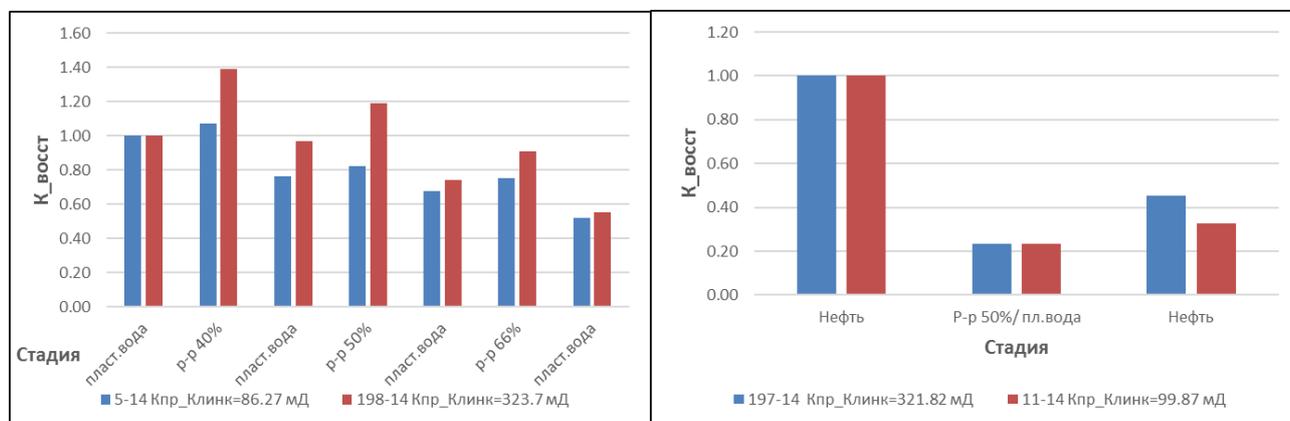


Рисунок 1 – Изменение коэффициента восстановления проницаемости в ходе фильтрационных экспериментов

По результатам фильтрационных экспериментов, при закачке компонентов БС в водонасыщенные участки пласта, было получено (Рис. 1), что фазовая проницаемость для растворов нитрата аммония в пластовых условиях выше, чем для пластовой воды в 1,1 - 1,4 раза, в зависимости от концентрации, что коррелирует с результатами определения набухаемости. При одном цикле закачки среднее падение проницаемости по модели пластовой воды составляет порядка 18 % от базовой проницаемости.

Ухудшение фильтрационных характеристик нефтенасыщенных коллекторов при фильтрации растворов селитры находится на уровне 55 %. Однако, если воспроизводить подобный эксперимент и в качестве вытесняющего агента использовать модель пластовой воды, то наблюдается более значительное ухудшение фильтрационных характеристик ($K_{\text{вост.пл.вода}} = 0,33$ против $K_{\text{вост.селитра}} = 0,45$).

Заключение

По результатам выполненной работы предложена методика проведения комплексных лабораторных исследований на керне для выделения основных эффектов применения БС. Оценены некоторые физико-химические эффекты взаимодействия БС со структурой породы, рассмотрены фильтрационные свойства водных растворов аммиачной селитры, представляющие ценность при закачке и последующей добыче флюидов из скважин.

Полученные результаты находят применение в качестве тестовых экспериментов при применении технологии ТГХВ БС на реальных месторождениях, позволяя спрогнозировать, в первую очередь, эффективность данного МУН, ожидаемый эффект на целевом месторождении. Кроме того, данные исследования позволяют определить различные технологические параметры состава БС, параметры закачки и возможные сопряженные проблемы, что достигается в комплексе с остальными видами исследований (химическими, аналитическими, тестами на совместимость и т.д.). При выборе методов лабораторных исследований необходимо грамотное аналитическое обоснование и теоретическое представление о процессах, происходящих в пористых средах.

Список литературы

1. *Чебан А.И.* Лабораторные методы определения влияния бинарных смесей на ФЕС терригенных пород / А.И. Чебан, П.П. Голуб, Р.О. Рыков, И.С. Шахматов // Сборник Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии» Том III (III) [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС». 2020. С. 194–197.
2. *Александров Е.Н.* Добыча трудноизвлекаемых и неизвлекаемых запасов нефти с помощью технологии бинарных смесей / Е.Н. Александров, Н.М. Кузнецов, С.Н. Козлов и др. // Георесурсы. 2016. Т. 18. № 3, Ч.1. С. 154–159.
3. *Вершинин В.Е.* Кинетика химических реакций при термогазохимическом воздействии на призабойную зону водными растворами бинарных смесей / В.Е. Вершинин, М.В. Вершинина, В.Б. Заволжский и др. // Нефтяное хозяйство. 2016. №12. С. 114–117.
4. *Жигач К.Ф., Яров А.Н.* Об оценке набухаемости глин / К.Ф. Жигач, А.Н. Яров // Изв. ВУЗов «Нефть и газ». 1959. № 10. С. 31–33.
5. ОСТ 39-195-86 «Нефть. Метод определения коэффициентов вытеснения нефти водой в лабораторных условиях»

**Hydrothermal processes in the Neogene rocks
of the southeastern coast of Kamchatka
according to microscopic studies in connection with the prospects
for oil and gas potential
(on the example of areas of Cape Sopochny, Cape Piratkov, Utashud Island)**

Larisa N. Boldushevskaya¹, Vladimir A. Kolesnikov², Maxim A. Bulgakov²

¹*LLC «RN-KrasnoyarskNIPIneft», Krasnoyarsk,
BoldushevskayaLN@knipi.rosneft.ru*

²*LLC «RN-SamaraNIPIneft», Samara*

Hydrothermal processes have manifested themselves in Kamchatka throughout geological history in connection with magmatic activity. The contact zones of volcanic and intrusive rocks are characterized by intense contact-metasomatic transformations (in particular, propylitization, silicification and hornfelsing). Based on the results of the 2019 field geoseminar, a microscopic description of petrographic thin sections of volcanogenic rocks of the Vilyuchin Formation (Pg₃ – N_{1vI}) from the outcrops of Cape Sopochny, Cape Piratkov, Utashud Island was performed. Secondary minerals in the studied collection are mainly represented by clay and siliceous minerals – authigenic quartz, tridymite, developed along cracks and in the groundmass. In some cases, local carbonatization and albitization are noted. High-temperature solutions, acting on effusive and volcanic-sedimentary rocks (andesites, basalts, tuffs, tuffaceous breccias and sandstones), cause their compaction, strengthening, increase in deformation characteristics, decrease in porosity and permeability for formation fluids. Judging by the composition of secondary minerals, the rocks have undergone hydrothermal transformations at depths of at least 1,5 km, and now, after upward movements and erosion of the overlying deposits, they come to the surface.

Keywords: Kamchatka, Neogene volcanic rocks, Vilyuchinskaya Formation, hydrothermal mineral formation

**Проявления гидротермальных процессов в неогеновых породах
юго-восточного побережья Камчатки
по данным микроскопических исследований
и в связи с перспективами нефтегазоносности
(на примере участков мыса Сопочного, мыса Пираткова, о-ва Уташуд)**

Л.Н. Болдушевская¹, В.А. Колесников², М.А. Булгаков²

¹*ООО «ОН-КрасноярскНИПИнефть»*

²*ООО «СамараНИПИнефть»*

Гидротермальные процессы проявились на Камчатке на протяжении всей геологической истории в связи с магматической активностью. Контактные зоны вулканических и интрузивных пород характеризуются интенсивными контактно-метасоматическими превращениями (в частности, пропилитизацией, силикатизацией и роговогвинообразованием). По результатам полевого геосеминара 2019 г. выполнено микроскопическое описание петрографических тонких разрезов вулканогенных пород Вилучинской свиты (Pg₃ - N_{1vI}) из выходов мыса Сопочного, мыса Пиратков, о. Уташуд. Вторичные минералы изученной коллекции представлены в основном глинистыми и кремнистыми минералами - аутигенным кварцем, тридимитом, развитыми по трещинам и в грунте. В некоторых случаях отмечается местная карбонизация и альбитизация. Высокотемпературные растворы, действующие на эффузивные и вулканогенно-осадочные породы (андезиты, базальты, туфы, туфовые брекчия и песчаники), вызывают их уплотнение, упрочнение, повышение деформационных характеристик, снижение пористости и проницаемости для пластовых флюидов. Судя по составу вторичных минералов, породы подверглись гидротермальным преобразованиям на глубинах не менее 1,5 км, и теперь, после восходящих движений и эрозии перекрывающих отложений, они выходят на поверхность.

Ключевые слова: Камчатка, вулканогенные породы неогена, вилучинская свита, гидротермальное минералообразование

Гидротермальные процессы проявляются на Камчатке в течение всей геологической истории в связи с магматической деятельностью. Для контактовых зон вулканогенных и интрузивных пород характерны интенсивные контактово-метасоматические преобразования (в частности пропилитизация, окварцевание и ороговикование). Гидротермальные системы формируются как вблизи вулканических построек в пределах вулcano-тектонических структур (депрессий, кальдер), так и в пределах тектонических структур (грабенов, зон разломов), развивающихся в условиях деформаций растяжения (Луцицкий, 1985).

По результатам полевого геосеминара 2019 г. (Булгаков и др., 2019) выполнено микроскопическое описание петрографических шлифов вулканогенных пород вилючинской свиты (Pg₃ – N_{1v1}) из обнажений мыса Сопчного, мыса Пираткова, о-ва Уташуд. К вилючинской свите отнесены эффузивно-пирокластические и субвулканические образования среднего-основного состава: базальты, андезибазальты, агломератовые и псефитовые туфы, диорит-порфириды (рис. 1). Субвулканическая фация объединяет вулканическую интрузию диорит-порфиридов, тела андезитов и дайки андезибазальтов. Дайки имеют вертикальное падение, мощность не более 10 м, меридиональное простирание.



Рисунок 1 – Обнажения туфогенных алевролитов и печаников вилючинской свиты, о. Уташуд

Изученные породы: туфы, туфогенные брекчии, андезиты избирательно подвергались воздействию гидротермальных растворов: наряду с неизменными кластолавами андезитов и туфами ближе к зонам разломов и субвулканическим интрузиям отмечаются породы разной степени преобразования (рисунки 2-3). На рисунках 4-7 показаны проявления гидротермальных процессов в неогеновых породах вилючинской свиты м. Сопчного и о. Уташуд под микроскопом. Вторичные минералы в изученной коллекции представлены преимущественно глинистыми и кремнистыми минералами – аутигенным кварцем, тридимитом, развитыми по трещинам и в основной массе. В ряде случаев отмечается локальная карбонатизация и альбитизация. Первичные обломки полевого шпата частично глинизированы. Проявлением гидротермальных процессов является образование яшм и яшмоидных пород, представленных кремнистыми минералами и гидроокислами железа. Таким образом, в результате гидротермальных процессов первичные компоненты вулканогенных пород (темноцветные минералы, плагиоклазы, вулканическое стекло) замещаются вторичными, причем замещение, как правило, носит псевдоморфный характер.

Высокотемпературные растворы, воздействуя на эффузивные и вулканогенно-осадочные породы (андезиты, базальты, туфы, туфогенные брекчии и песчаники), вызывают их уплотнение, упрочнение, повышение деформационных характеристик, снижение пористости и проницаемости для пластовых флюидов. Это происходит вследствие заполнения межобломочного/межкристаллического пространства вторичными минералами, формирования жестких, прочных контактов между зернами/кристаллами, перекристаллизации базиса во вторичный микроагрегат, состоящий из более плотных и прочных минералов (Трухин и др., 1979).

Пропилитизированные и вторично окварцованные зоны образуются как в связи с процессами, протекающими в окружении вулканических построек, так и независимо от этих построек. В последнем случае зоны гидротермально-метасоматических изменений сопутствуют общим региональным преобразованиям, охватывающим более или менее обширные древние или современные вулканические области. Согласно исследованиям С.И. Набоко (Набоко, 1963), в кратерах и на склонах современных активных вулканов опалитовые и аргиллизированные породы образуются в настоящее время. Среди этих пород имеются разновидности моноопаловые, опало-алунитовые, опало-каолинитовые, кварцево-серицитовые и слабо пропилитизированные с серой. Источником метаморфизма пород в таких условиях являются магмы каналов и корней вулканов. Наряду с этим развивается объемный метаморфизм, охватывающий площади в десятки квадратных километров и уходящий на глубину в несколько километров. В таких условиях под воздействием кислых растворов близ поверхности происходит каолинизация, опалитизация, алунитизация, а глубже – монтромелонизация, цеолитизация, опалитизация, фельдшпатизация, окварцевание, серицитизация, карбонатизация и пропилитизация.

Обломки вторичных гидротермальных минералов встречаются в современных прибрежно-морских песчаных отложениях побережья Камчатки и Курильских островов. В частности, в некоторых пробах вулканомиктовых песков о. Шумшу и Парамушир отмечается до 10 % кварца, обломки пропилитов (Булгаков и др., 2020).

Изученные гидротермальные преобразования олигоцен-миоценовых пород юго-восточного побережья Камчатки связаны с формированием Восточно-Камчатского субэарального вулканического пояса, широким развитием плиоценовых субвулканических тел. Судя по составу вторичных минералов породы испытали гидротермальные преобразования на глубинах не менее 1,5 км и в настоящее время после восходящих движений и эрозии вышележащих отложений выходят на поверхность.

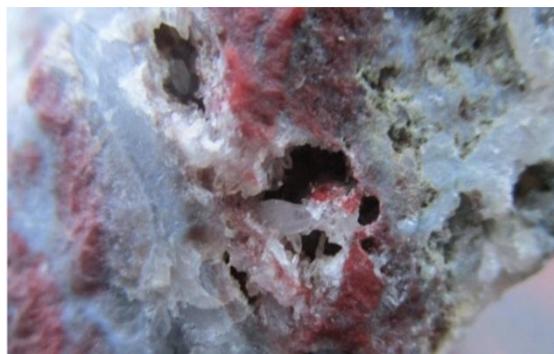


Рисунок 2 – Результаты гидротермального минералообразования (аметист, кварц, халцедон), мыс Лопатка



Рисунок 3 – Результаты гидротермального минералообразования в трещинах андезит-базальтовых пород, мыс Пиратков

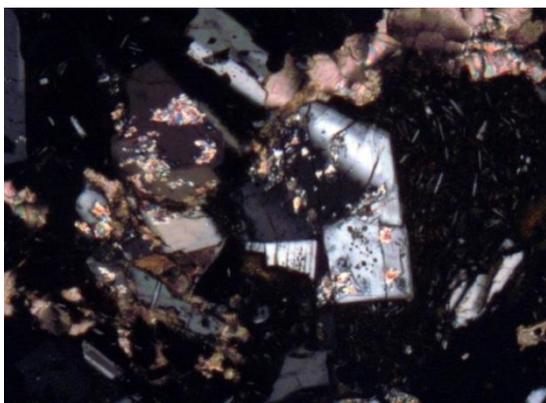


Рисунок 4 – Мыс Сопочный. Туфолава андезита. Оплавленные кристаллы полевого шпата, отмечается флюидальная структура основной массы вулканического стекла с микролитами деанортизированного альбита, проявление карбонатизации. Николи скрещены

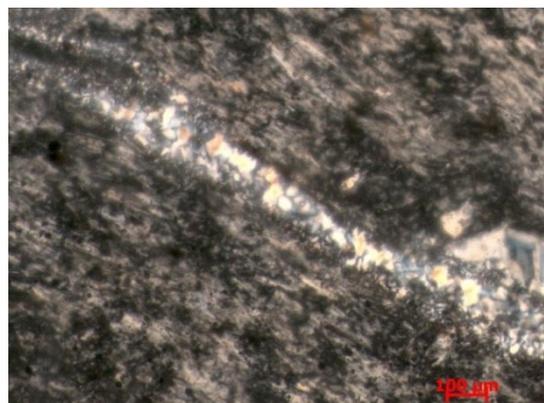


Рисунок 5 – Мыс Сопочный. Пилотакситовая структура андезита. Трещина, заполненная аутигенным кварцем, глинизация основной массы. Николи скрещены

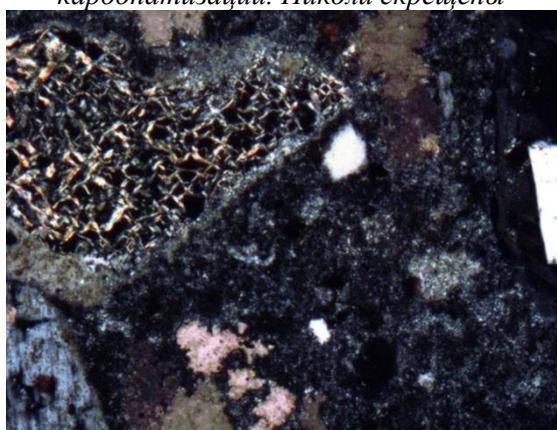


Рисунок 6 – о. Уташуд. Туф кристалло-витрокластический. В поле зрения обломок аргиллизированного андезита, глинизированная основная масса, карбонатизация и оплавленный обломок полевого шпата. Николи скрещены

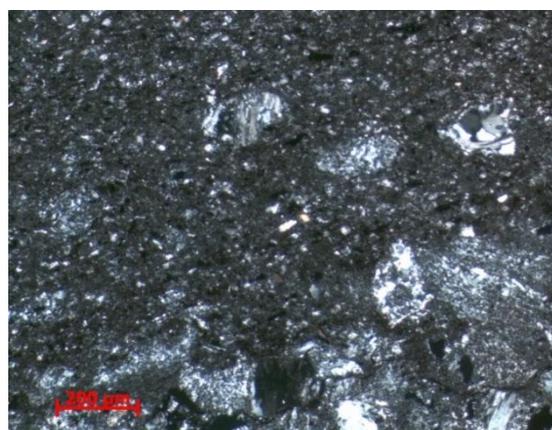


Рисунок 7 – о. Уташуд. Вулканогенная брекчия. Глинизированный и кремненная основная масса, порфиоровые выделения представлены аутигенным кварцем. Николи скрещены

Список литературы

1. Булгаков М.А. К вопросам об интенсивности новейших тектонических движений юго-восточной части Камчатского полуострова и севера Курильских островов, гидротермально-метасоматических изменениях эффузивных пород и перспективах нефтегазоносности региона / М.А. Булгаков, В.А. Колесников, В.В. Терешкин, Л.Н. Болдушевская, Д.М. Савчик // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2020. № 7. С. 10–22.
2. Булгаков М.А. Итоги геологического семинара по теме: «Изучение перспектив нефтегазоносности Притихоокеанской нефтегазоносной провинции в южной части сутуры Охотско-Беринговоморского мегаблока – кайнозойского осадочного чехла (эоцен-олигоценый и миоценовый комплексы пород) Тихоокеанского островодужного бассейна / М.А. Булгаков, В.А. Колесников, В.В. Терешкин, Л.Н. Болдушевская, Д.М. Савчик Самара: ООО «СамараНИПИнефть». 2019 г. 18 с.
3. Луцицкий И.В. Палеовулканология М.: Наука, 1985. 280 с.
4. Набоко С.И. Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях М.: АН СССР, 1963. С. 24–34.
5. Трухин Ю.П. Современный гидротермальный процесс в эволюции вулканизма (по геохимическим данным) / Ю.П. Трухин, Р.А. Шувалов М.: Наука, 1979. 135 с.

Assessment of the Possibility of Disposal Carbon Dioxide in North Stavropol UGS

Alexey V. Tudvachev¹, Pavel K. Konosavsky², Svetlana A. Pereverzeva,
Viatcheslav V. Tikhomirov

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

¹tudvachev@dhspsb.ru, ²konosavsky@dhspsb.ru

Ground disposal is one of the methods of CO₂ utilization. There was a number of projects already implemented in the world. This article presents (for the first time in Russia) an estimating of opportunity of CO₂ utilization the case of Pelagiadinskoe North Stavropol UGS by analytical techniques and numerical TOUGH modeling of heat and mass transfer. Evaluation findings of CO₂ delution in residual and edge waters of UGS are described.

Keywords: underground disposal of carbon dioxide, underground gas storage, heat and mass transfer modeling, groundwater

Оценка возможности захоронения углекислого газа в Северо-Ставропольском ПХГ

А.В. Тудвачев, П.К. Коносавский, С.А. Переверзева, В.В. Тихомиров

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Одним из способов утилизации CO₂ является его подземное захоронение. В мире уже реализован ряд таких проектов. В данной статье представлены (впервые в России) результаты оценки возможности захоронения CO₂ на примере Пелагиадинского поднятия действующего Северо-Ставропольского ПХГ как аналитическими методами, так и при помощи численного TOUGH моделирования тепломассопереноса. Представлены результаты оценки растворения CO₂ в остаточных и контурных водах подземного хранилища газа (ПХГ).

Ключевые слова: подземное захоронение, углекислый газ, подземное газохранилище, моделирование тепломассопереноса, подземные воды

Введение

В соответствии Парижским соглашением к Рамочной конвенции ООН по изменению климата Российская Федерация взяла на себя обязательства не увеличивать выбросы вредных газов в атмосферу по сравнению с ситуацией 1990 г.

Одной из технологий позволяющей улучшить экологический баланс в окружающей среде является утилизация промышленных выбросов путем их захоронения в глубокие геологические структуры. Эффективность такой утилизации определяется также изменчивостью свойства углекислого газа с ростом температуры и давления (что характерно для глубоких геологических структур).

Для РФ данное направление является новым, но при этом существуют условия для организации полигонов утилизации с использованием уже существующей инфраструктуры эксплуатируемых и законсервированных месторождений углеводородов и ПХГ.

Подходы, изложенные в данной работе, могут быть использованы для разработки технологических решений, связанных с утилизацией CO₂ в Северо-Ставропольское ПХГ, а также в любые другие резервуары-аналоги.

Физические основы взаимодействия CO₂ с геологической средой

Диоксид углерода является одним из двух оксидов углерода. При нормальных условиях плотность CO₂ составляет 1,977 кг/м³. Углекислый газ может существовать в

четырёх фазовых состояниях – газообразном, жидком, твёрдом и сверхкритическом. В газообразном состоянии CO_2 хорошо растворяется в воде (0,88 объёма в 1 объёме воды), частично взаимодействуя с ней с образованием угольной кислоты. При резком охлаждении (за счёт расширения) CO_2 способен переходить сразу в твёрдое состояние, минуя жидкую фазу. В жидком состоянии углекислота имеет среднюю плотность 771 кг/м^3 и существует только при давлении 482–519 кПа и температуре $0 - (-56,5) \text{ }^\circ\text{C}$.

При температуре больше $31,6 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении, превышающем 7,39 МПа CO_2 находится в так называемом сверхкритическом состоянии (Bachu, 2000) и проявляет свойства как жидкости (плотность), так и газа (вязкость) (Flett et al., 2003; Henz et al., 1987; Jahne et al., 1987). Обычно в пластах с глубиной залегания более 1000 м CO_2 находится в сверхкритическом состоянии, а в выработанных пластах месторождений углеводородов из-за сниженного пластового давления он может находиться и в газообразном состоянии.

Геолого-гидрогеологические условия Северо-Ставропольского ПХГ

В качестве одного из объектов для закачки CO_2 с целью его утилизации было рассмотрено действующее Северо-Ставропольское подземное хранилище газа.

Северо-Ставропольское ПХГ в хадумском горизонте создано на базе достаточно крупного истощенного газового месторождения. Глубины залегания продуктивного горизонта варьируют от 650–750 м. В структурном плане хадумская залежь приурочена к двум поднятиям платформенного типа – Северо-Ставропольскому и Пелагиадинскому, соединенным между собой неглубокой седловиной. Северо-Ставропольское поднятие простирается с юго-запада на северо-восток. В пределах контура газоносности по хадумской залежи ее размеры составляют $33 \times 18 \text{ км}$.

Хадумский горизонт представлен палеогеновыми отложениями нижнего олигоцена. Изучение пород-коллекторов газа Ставрополя показывает, что хадумский газовый горизонт по своему строению не является каким-то единым, однородным, выдержанным в литологическом отношении пластом. Он представляет собой систему часто чередующихся друг с другом макро, микропрослоев и линз алевроитов и глин. Выделяются две основные продуктивные пачки. Алевроитовая пачка, толщина которой составляет порядка 25–30 м и алевроитовая пачка книзу постепенно переходит в пачку переслаивания, толщина которой составляет 55–65 м. На большей части месторождения толщина хадумского горизонта достигает порядка 100 м, в восточной части она уменьшается до 65–75 м. Нижняя граница залежи определяется положением контакта газ-вода, которая наклонена на восток и изменяется от отметок – 463 на западе до – 518 на востоке. Хадумская залежь – пластовая, сводовая со значительной по размеру (около 110 км^2) зоной отсутствия подошвенной воды. По своей продуктивной характеристике эта часть пласта обладает высокими коллекторскими свойствами. Поэтому на Северо-Ставропольском ПХГ было принято центрально-групповое размещение эксплуатационных скважин в наиболее продуктивной части площади, обладающей максимальной проницаемостью и толщиной продуктивного пласта и характеризующейся отсутствием подошвенной воды. Наибольшая эффективная пористость 25–33 % и высокая проницаемость $300\text{--}1700 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ имеет пачка, представленная алевроитами, которые преимущественно залегают в верхней части хадумского горизонта. Пачка глинистых алевролитов имеют худшие коллекторские свойства, пористость варьирует от 13–25 %, а проницаемость от $10\text{--}300 \times 10^{-15} \text{ м}^2$. Содержание обломочной части в породах составляет 75–100 %, глинистой 0–25 %. По составу пород обломочная часть представлена: кварцем 80–95 %, полевыми шпатами 5–12 %, глауконитом 7 %, слюдами 3–12 %. Состав глинистых минералов гидрослюдисто–монтмориллонитовый с небольшой примесью каолинита и хлорита.

Начальное пластовое давление в хадумском горизонте Северо-Ставропольского газового месторождения составляло 6,6 МПа, пластовая температура $66 \text{ }^\circ\text{C}$. Газ по составу метановый, с содержанием метана до 98 %. Месторождение в течение 27 лет разрабатывалось в условиях газового режима с небольшим внедрением пластовых вод. За время разработки пластовое давление снизилось до 0,8 МПа. После создания ПХГ давление в

хадумском горизонте стало расти и на сегодняшний день в среднем составляет порядка 3 МПа, а пластовая температура 60 °С (Рубан, 2008).

Взаимодействие закаченного CO₂ с подземными водами в хадумском горизонте

Подземные воды хадумского горизонта по В.А. Сулину гидрокарбонатно-натриевые, с минерализацией около 28,5 г/л, рН – 7,31, удельным весом 1,019 и низким содержанием кальция и магния в около 8 мг/л.

В случае закачки CO₂ в термобарических условиях Пелагиадинского поднятия хадумского горизонта при температуре закачки соответствующей пластовой – 60 °С, и максимально возможному забойному давлению закачки – 5 МПа, что подтверждено результатами численного моделирования, CO₂ будет находиться в «нормальном» газообразном состоянии (Рис. 1).

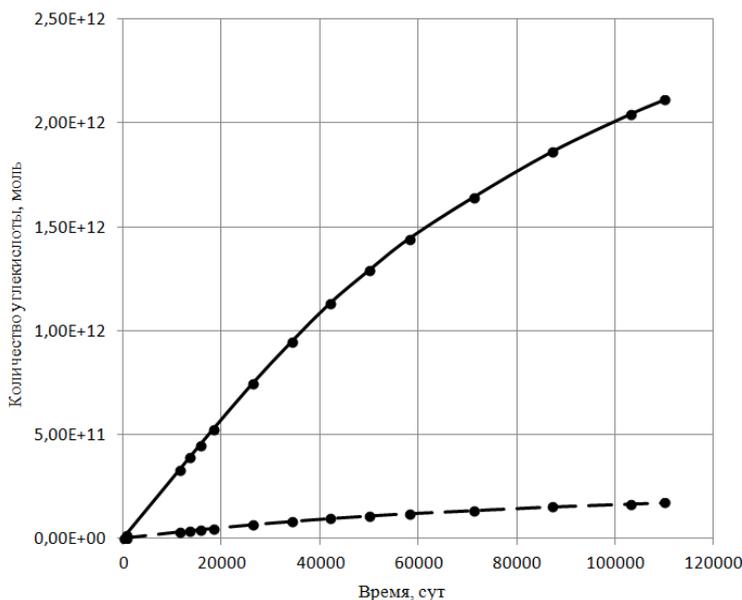


Рисунок 1 – График изменения во времени количества CO₂ находящийся в водной и газовой фазах.
Черная линия – CO₂ в газовой фазе, пунктир – CO₂ в водной фазе

Согласно аналитическим оценкам закачки (результаты которых подробно представлены в работе (Тудвачев, 2016), всего лишь 0,5 % CO₂ растворится в контурных водах хадумского горизонта, что намного меньше значений растворенного углекислого газа в остаточных водах, которые по аналитическим расчетам составили 8,1 – 14,3 %.

Численное моделирование закачки CO₂ в Северо-Ставропольское ПХГ

Для численного решения задачи утилизации CO₂ в хадумский горизонт использовался программный комплекс TOUGH2 (Transport Of Unsaturated Ground Water and Heat). TOUGH2 позволяет одновременно решить нестационарную задачу фильтрации, массопереноса и теплопереноса в насыщенной и ненасыщенной пористой или трещиновато-пористой среде для смешивающихся и несмешивающихся жидкостей и газов с учетом плотностной конвекции.

При построении модели рассматривается общая площадь газоносности. Модельная область в плане была разбита на 14000 блоков (по оси X – 140 блоков и по оси Y – 100 блоков), разбивка на блоки равномерная с размером каждого блока 290 × 290 м (Рис. 2).

В модели система, состоит из двух слоев:

- *первый слой* представлен алевролитами. Этот слой подразделен на два подслоя отличающимися друг от друга своими коллекторскими свойствами;
- *второй слой* – приурочен к алевролитам глинистым. Этот слой также как и первый подразделяется на два подслоя представленных соответственно алевролитами глинистыми и алевролитами сильно глинистыми.

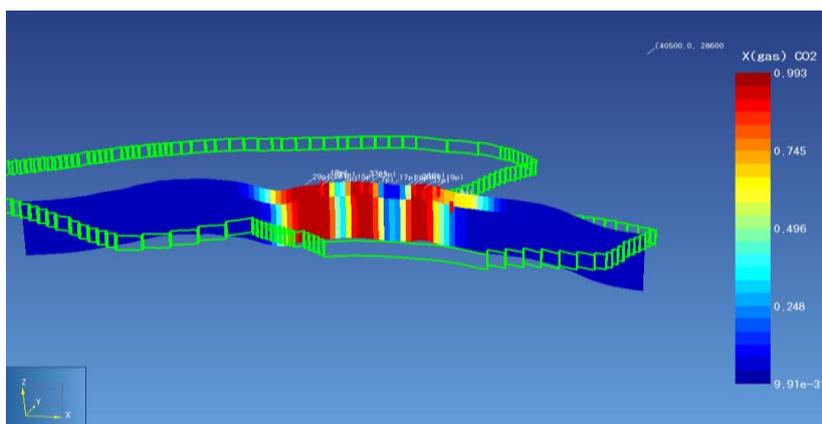


Рисунок 2 – Профильное модельное распределение CO_2 в хадумском горизонте на 20 лет закачки

Профильные границы рассматриваемых слоев задавались через абсолютные отметки подошвы и кровли каждого из них.

Из приведенных балансовых оценок распределения CO_2 в газовой и жидкой фазах следует, что не более 8 – 10 % CO_2 растворится в жидкой фазе (в остаточной воде), из них – около 1,4 % приходится на растворение в пластовых водах на контуре Пелагиады. Такие оценки в полной мере согласуются с аналитическими расчетами (Тудвачев, 2016).

Выводы

1. При закачке в Северо-Ставропольское ПХГ углекислый газ не перейдет в сверхкритическое состояние и будет находиться в газообразном состоянии.

2. Результаты оценки величины растворения углекислоты аналитическими методами и с помощью численного моделирования показали хорошую сходимость. Рассчитано, что 8 – 14 % CO_2 растворится в остаточных водах Северо-Ставропольского ПХГ, а в контурных водах хадумского горизонта 0,5 – 1,4 %, что можно считать существенным. С ростом пластового давления растворимость увеличивается, а значит и процесс растворения углекислоты в остаточных водах имеет важное значение при закачке, и требует подробного изучения при проектировании закачек на подобных объектах.

Список литературы

1. Рубан Г. Н. Повышение эффективности системы геолого-геофизического контроля за эксплуатацией подземных хранилищ газа: автореф. дис. канд. техн. наук. М.: ВНИИГАЗ, 2008. 25 с.

2. Тудвачев А. В. Аналитические и численные расчеты растворения CO_2 в подземных водах Северо-Ставропольского ПХГ в случае его возможного захоронения / А. В. Тудвачев, В.В. Тихомиров // Вестник СПбГУ. Науки о земле. 2016. Том № 4.

3. Bachu, S. Sequestration of CO_2 in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change // Energy Conversion and Management 2000. Vol. 41 (9). 953-970.

4. Flett, M. A. Subsurface sensitivity study of geologic CO_2 sequestration in saline formations M. A. Flett, I. J. Taggart, J. Lewis, R. M. Gurton // The Second Annual Conference on Carbon Sequestration, 5-8 May 2003, Alexandria, USA. National Energy Technology Laboratory, United States Department of Energy, pp. [CDRom] (2003).

5. Henz G. Measurement of the diffusion coefficients of sparingly soluble gases in water / G. Henz, W. Dietrich // J. Geophys. Res. 1987. 92 (C10), 10767–10776.

Hydrothermal stage in the formation of the hydrodynamic system of the sedimentary cover of the Siberian platform

Aleksej I. Surnin, Irina V. Litvinova, Natal'ya A. Ivanova

*Siberian research Institute of Geology Geophysics and mineral resources, Novosibirsk, Russia
ogec@sniiggims.ru*

A retrospective assessment of paleohydrogeological conditions in the Western part of the Siberian platform shows that from the pre-Triassic to the present, there were several stages of activation of upward fluid discharge in the sedimentary cover of the Siberian platform. In the formation of the (modern) hydrodynamic system, the Jurassic-Cretaceous period of geotectonic history was of decisive importance, which many researchers consider as the time of domination of post-Trapp hydrothermal processes.

Keywords: Siberian platform, traps, explosion tubes

Гидротермальный этап в формировании гидродинамической системы осадочного чехла Сибирской платформы

А.И. Сурнин, И.В. Литвинова, Н.А. Иванова

*Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,
Новосибирск, Россия*

Ретроспективная оценка палеогидрогеологических условий западной части Сибирской платформы показывает, что с предтриасового периода до настоящего времени в осадочном чехле Сибирской платформы наблюдалось несколько стадий активизации разгрузки флюидов. В формировании (современной) гидродинамической системы решающее значение имел юрско-меловой период геотектонической истории, который многие исследователи рассматривают как время господства посттрапповых гидротермальных процессов.

Ключевые слова: Сибирская платформа, траппы, трубки взрыва

Для решения прогнозно-поисковых задач была составлена гидродинамическая модель бассейна (Рис. 1). Для обоснования модели сформировано представление об *обобщенной гидродинамической модели осадочного бассейна* Курейской синеклизы, которое учитывает главные палеогидродинамические обстоятельства и особенности современного гидродинамического поля в осадочном чехле, размещение термо- и пьезомаксимумов, проявлений восходящей разгрузки флюидов и другие сопутствующие процессы. При этом постулируется ведущая роль региональных глубинных разломов, которые во все эпохи активизаций контролировали направления миграции, сами служили путями межпластовых перетоков глубинных флюидов и являются флюидоактивными в настоящее время. Ключевое значение в структуре гидродинамической модели имеет установленная пространственная соподчиненность гидрогеологических показателей нефтегазоносности (гидродинамических, геотермических, гидрогеохимических аномалий) с геолого-тектоническими особенностями разреза и поверхностными проявлениями.

Гидродинамический анализ территории включал: 1) предварительную обработку данных; 2) составление гидродинамических карт и разрезов, региональное гидродинамическое районирование; 3) анализ палеогидродинамических условий, выполненный предшественниками; 4) анализ проявлений современной разгрузки флюидов; 5) составление обобщенной гидрогеологической модели.

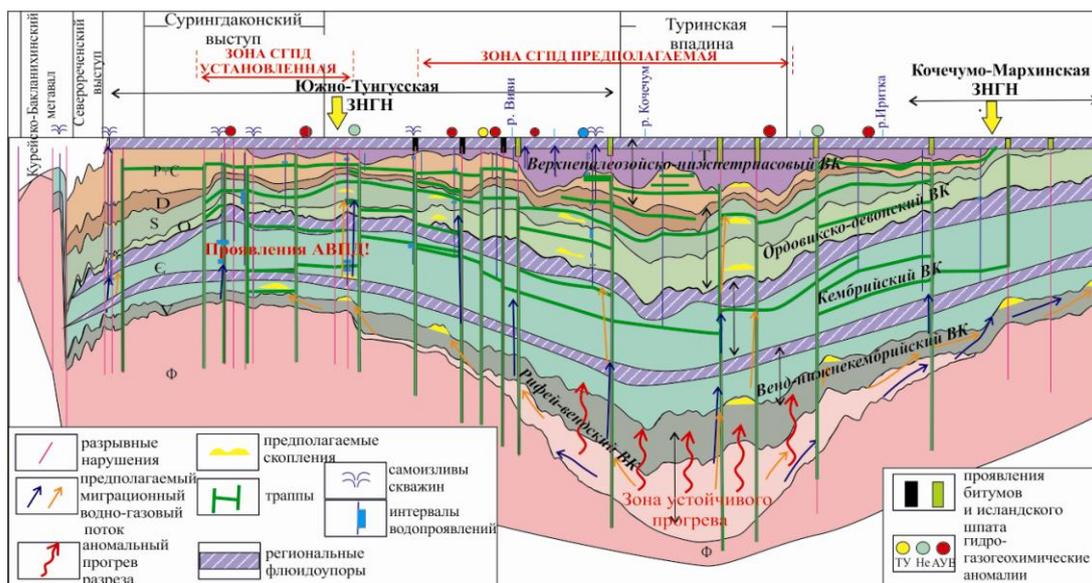


Рисунок 1 – Схематическая гидродинамическая модель осадочного чехла вдоль сейсмического профиля р. Нижняя Тунгуска

Большое внимание было уделено палеогидрогеологическим реконструкциям. Приняты во внимание работы Е.А. Баскова (1977), В.Н. Борисова (1978) и других исследователей для территории западной части Сибирской платформы.

В истории бассейна неоднократно возникали геологические ситуации с благоприятными условиями для разгрузки подземных вод, связанных с тектонической активизацией территории. Аналогично этапам миграции нефти, можно говорить о четырех этапах разгрузки хлоридных вод.

1) Дотрапповый – палеозойский этап. Предполагаемая разгрузка привела к появлению палеокарстовых пустот, наблюдаемых в разрезе галогенно-карбонатных отложений нижнего палеозоя.

2) Трапповый – верхнепалеозойский-нижнемезозойский этап. Трапповый магматизм как фактор интенсивной разгрузки подземных вод не подлежит сомнению, для стока существовали необходимые и достаточные предпосылки. Это огромный объем поставленных магматических продуктов: в осадочный чехол проникли многочисленные интрузии (от 3-5 до 46 %), сформировалась густая сеть тектонических разломов.

3) Посттрапповый – мезо-кайнозойский этап, состоящий из двух стадий: гидротермальной и постгидротермальной. Это доказывает различные гидротермальные образования в виде месторождений и проявлений полиметаллов, исландского шпата, нефтепроявлений и т.д. Постгидротермальная стадия – ее нижняя граница остается неясной, верхней возрастной границей может служить начало похолодания климата и формирования толщ многолетне-мерзлых пород в плейстоцене. Артезианский сток мог осуществляться под влиянием нормальных палеогеографических факторов, действие которых периодически усиливалось вследствие продолжающегося поднятия платформы. Разгрузка подтверждается нефтепроявлениями, возникшими на данной стадии.

4) Новейший – четвертичный этап. Основное содержание заключается в прогрессирующих неотектонических поднятиях, начавшихся еще в олигоцене. Поднятия привели к резкому расчленению рельефа (до 500-1000 м) в пределах плато Путорана, обновились древние и заложилась молодые флюидопроницаемые разломы, интенсифицировалась разгрузка (Вожов, 1971, 1977).

Следует отметить, что тектонические активизации мезо-кайнозойского этапа затронули и территорию Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. В этот период были заложены рифтовые системы, что привело «к образованию мегатрещиноватости осадочного чехла, формированию многочисленных дизъюнктивных и трещинных

дислокаций, что наряду с воздыманием территории способствовало дегазации пластовых вод, формированию и переформированию залежей» (Нежданов, 2008).

Для формирования современной гидродинамической системы осадочного чехла Курейской синеклизы определяющее значение имел юрско-меловой посттрапповый период геотектонической истории Сибирской платформы, который большинство исследователей рассматривают как время господства гидротермальных процессов – гидротермальный этап региональной миграции флюидов. Для этого этапа характерна длительная циркуляция по разрезу постмагматических растворов. При этом важно, что растворы из магматического очага использовали те же пути, что и трапповая магма – трещины, дайки, штоки, жилы траппов, каналы выброса пирокластики. В районах сосредоточения трубок взрыва существовали очаги гидровулканизма, по которым на поверхность разгружались огромные объемы термальных высоконапорных вод. Об этом свидетельствуют примеры рудоносного карста, структуры и продукты обрушения в каналах трубок взрыва, образовавшиеся за счет выщелачивания пород длительно существовавшим потоком гидротермальных растворов (Страхов, 1978, Феокистов, 1978). Показательным примером действия нижнемелового гидровулканизма являются рудоносные переуглубленные впадины Чадобецкого поднятия (Гузаев, 2010, Попова, 2010).

Продукты гидротермального этапа миграции флюидов в виде гидротермально-метасоматических образований – пластово-жильных карбонатов, месторождений исландского шпата в туфогенных породах нижнего триаса широко распространены в Тунгусской синеклизе. Они встречаются в бассейнах рек Северная Чуня, Илимпя, Северная Таймура, Иритка и др. (Киевленко, 1974). Гидротермальная миграция флюидов сопровождалась миграцией углеводородов, которая проявлена многочисленными выходами битумов, мальт, асфальтитов по всему разрезу осадочного чехла от нижнего палеозоя до триаса, включая вулканогенную формацию и щелочно-ультраосновные интрузии.

Итог ретроспективной оценки палеогидрогеологических условий заключается в понимании того, что активизация межпластовых перетоков рассолов периодически осуществлялась с дотриасового по настоящее время и в эти периоды могло происходить масштабное разрушение и переформирование залежей углеводородов.

Сделано предположение, что *в результате активных процессов палеоразгрузки флюидов на 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.

Данный вывод согласуется с оценкой огромной роли мезозойско-кайнозойского этапа в истории формирования Лено-Тунгусской НГП, который проявился в «интенсивном прогреве осадочного чехла, интенсифицировавшем процессы нефтегазообразования; в переформировании структурного плана, способствовавшем струйному перетоку УВ в новые ловушки» (Конторович, 1986).

Список литературы

1. *Вожов В.И.* Зоны разгрузки флюидов в Тунгусском бассейне / В. И. Вожов, С. А. Кашенко // Геология нефтегазоносных регионов Сибири. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1971. С. 137–141.
2. *Вожов В.И.* Подземные воды Тунгусского бассейна М.: Недра, 1977. 104 с.
3. *Конторович А.Э.* Лено-Тунгусская провинция – перспективный регион для создания новой базы добычи нефти и газа на востоке СССР / А. Э. Конторович [и др.] // Геология и геофизика. 1986. № 1. С. 3–14.
4. *Нежданов А.А.* Роль дегазации Земли в формировании месторождений УВ Севера Западной Сибири / А. А. Нежданов, А. Д. Авраменко, И. И. Халиулин // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы. М.: ГЕОС, 2008. С. 340-342.

5. *Страхов Л.Г.* Рудоносные вулканические аппараты юга Сибирской платформы Новосибирск: Наука, 1978. 117 с.

6. *Феоктистов Г.Д.* Петрология и условия формирования трапповых силлов Новосибирск: Наука, 1978. 168 с.

7. *Попова Н.Н.* Новые данные по стратиграфии бокситоносных отложений Чадобецкой площади / Н.Н. Попова, Т.Г. Прошина // Материалы и минерально-сырьевые ресурсы Центральной Сибири: мат. юбилейной науч.-практ. конф. Красноярск, 2010. С. 258–263.

8. *Гузаев А.А.* О происхождении котловин Чадобецкого поднятия, гидровулканизм, рудоносность / А.А. Гузаев // Материалы и минерально-сырьевые ресурсы Центральной Сибири: мат. юбилейной науч.-практ. конференции. Красноярск, 2010. С. 264–269.

9. *Киевленко Е.Я.* Геология и оценка месторождений исландского шпата М.: Недра, 1974. 160 с.

УДК 551.21 +550.81+690.92

**Geological, geophysical and morphostructural preconditiones
for the prospecting of new hydrocarbon and molecular hydrogen resources
in the deep horizons of the Kuril-Kamchatka island arc
and the West Siberian plate: a comparative analysis experience**

Ivan Delemen

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
delemen@kscnet.ru*

Based on a comparative regional analysis of the structural position of oil and gas fields (including the peculiarities of unloading hydrocarbons and molecular hydrogen on the earth's surface), possible geological, geophysical and morphostructural preconditions for expanding the resource basis of hydrocarbons and hydrogen energetics in the Kuril-Kamchatka region and in Western Siberia are considered.

Keywords: oil and gas resources, hydrogen resources, calderas, forecast methodology, Western Siberia, Kamchatka

**Геолого-геофизические и морфоструктурные предпосылки
поиска новых ресурсов углеводородов и молекулярного водорода
на глубоких горизонтах Курило-Камчатской островной дуги
и Западно-Сибирской плиты: опыт сравнительного анализа**

И.Ф. Делемень

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

На основе сравнительного регионального анализа структурной позиции нефтегазовых месторождений (с учетом особенностей разгрузки на земную поверхность углеводородов и молекулярного водорода) рассмотрены возможные геолого-геофизические и морфоструктурные предпосылки расширения ресурсной базы углеводородов и водородной энергетики в Курило-Камчатском регионе и в Западной Сибири.

Ключевые слова: нефтегазовые ресурсы, ресурсы водорода, кальдеры, методология прогноза, Западная Сибирь, Камчатка

*Посвящается памяти Г.И. Аносова, А.И. Байкова, А.И. Поздеева
— энтузиастов и первопроходцев в изучении перспектив нахождения
новых ресурсов углеводородов в вулканических районах Камчатки*

Введение

Истощение запасов месторождений нефти и рост интереса нефтегазодобывающих компаний к приобретению новых лицензионных участков делают приоритетными задачи расширения ресурсной базы для поиска перспективных объектов для воспроизводства минерально-сырьевой базы углеводородного (УГВ) сырья страны [1]. Актуальность таких работ в Камчатском крае определяется тем, что поиски сопоставимых с Сахалином (по запасам) месторождений нефти и газа в перспективных кайнозойских структурах Камчатки и на прилегающих территориях Охотского моря, не оправдали ожиданий. Расширить возможности прогноза и поисков таких ресурсов позволяет трансфер знаний из смежных областей наук о Земле [2], а также сравнительные исследования геологических факторов нефтегазоносности менее изученных регионов с другими, хорошо изученными регионами (метод аналогии).

В соответствии с районированием нефтегазоносных провинций (НГП) России, Западная Камчатка и Охотоморское побережье Курильских островов с прилегающими акваториями, относятся к Охотской НГП. Тихоокеанский шельф и смежные с ним части суши Камчатского края и Курильских островов, относятся к Притихоокеанской НГП.

Для Притихоокеанской НГП характерна наибольшая концентрация вулканоструктур и наивысшая интенсивность процессов эндогенной активности, особенно тектонических деформаций, сейсмичности, вулканизма и флюидного теплопереноса. Изучение здесь перечисленных процессов позволяет лучше понять специфику нефтегазовой геологии и геохимии тех провинций, где подобные явления наблюдались в далеком прошлом, Именно этот регион может стать полигоном для детального исследования современных приповерхностных и малоглубинных аналогов тех процессов формирования и миграции флюидов, которые в других НГП происходили на больших глубинах и миллионы тому назад.

Можно надеяться, что трансфер таких исследовательских технологий может дать лучшее понимание вопросов геологии и геохимии нефти и газа даже для таких хорошо изученных нефтегазоносных регионов, как Западная Сибирь. В качестве примера можно привести Рогожниковское месторождение в центральной части Западно-Сибирской НГП. При изучении выявленных в триасовой вулканогенно-осадочной толще коллекторов, было установлено, что их образование обусловлено как первичной пористостью слагающих резервуар вулканитов, так и вторичными преобразованиями пород [3]. Очевидно, что для лучшего понимания трехмерной структуры этого резервуара необходим трансфер знаний по вулканологии с учетом данных о строении аналогичных вулканоструктур Камчатки и других регионов.

С другой стороны, при всей очевидной несхожести тектоники, геохимии, истории тектонического развития обеих перечисленных провинций, в нефтегазовой геологии этих регионов имеются определенные черты сходства. Перечислим некоторые из них, важнейшие для понимания перспектив нефтегазоносности Камчатки с учетом трансфера знаний о наиболее изученной в России в этом отношении территории Западно-Сибирской НГП.

Факторы сходства

Наиболее значимыми факторами сходства являются: 1) латеральная приуроченность наиболее крупных залежей к рифтам или рифтоподобным тектоническим структурам типа грабен-офтогов и крупных рифтов глубинного (нижнекорового и мантийного) заложения; 2) многоэтажность углеводородных резервуаров типична для многих НГП; 3) значительная роль надвиговой тектоники в вертикальной локализации нетегазоперспективных структур; 4) разновозрастность происхождения нефти и газа. Образование залежей за счет вертикального переретока в коллектор УГВ иного возраста, чем возраст самого коллектора; 5) наличие среди коллекторов осадочного генезиса толщ вулканогенного и вулканогенно-осадочного

происхождения; 6) значительная роль в формировании разноглубинных ловушек разновозрастных геологических тел инъективного происхождения (субвулканических, интрузивных, нептунических инъективитов и др.), нарушивших границы стратифицированных осадочных комплексов; 7) значительная роль в пространственном размещении среди вулканогенных стратифицированных резервуаров УГВ, ловушек нефти и газа, повышенная проницаемость которых обусловлена формированием палеовулканических и иных изометричных палеомагматических структур (кальдер, вулcano-тектонических депрессий, интрузивных штоков, трубок, протрузий и т.д.); 8) важная роль процессов и продуктов гидротермального теплопереноса, в образовании, миграции и накоплении углеводородов в земной коре; 9) существует пространственная связь нефтегазовых залежей в недрах НГП с ареалами современной сосредоточенной или диффузной разгрузки нефти на земную поверхность, и газов – в атмосферу.

Перспективы трансфера знаний и технологий для расширения ресурсной базы центральной части НГП

Центральная часть Западно-Сибирской НГП. Примечательной особенностью геологического строения залежей вулканогенно-осадочных пород триасового комплекса Рогожниковского месторождения являются трудности корреляции разрезов даже близко расположенных скважин [3]. Эта проблема (наряду с корреляцией фазового состояния флюидов даже в смежных скважинах) злободневна для оценки вулканогенно-осадочных резервуаров и для других регионов России и мира. Лучшему пониманию этой проблемы может помочь учет данных о строении четвертичных кальдер. Так, наши исследования позволили установить, что пространственное положение диатрем, воронок гидротермального взрыва и ареалы интенсивной дегазации из недр гидротермального резервуара кальдеры Узон на Камчатке определяются пространственным узором (паттерном) сквозных (по отношению к кальдере) разрывов и штокообразных тел доголоценовых внутрикальдерных магматических интрузий [4].

Курило-Камчатский сегмент Охотской НГП недоизучен и в шельфовой своей части, и тем более в наземной. В наземной части следует обратить внимание на трансфер и развитие гидрогеологических критериев нефтегазоносности. Наступило время для разработки новых критериев нефтегазоносности этого сегмента НГП на основе концепций глубинной нефти и газа (дегазации планеты, глубинных геофлюидов и т.д.). Следует обратить особое внимание на приуроченность вертикальной миграции глубинных геофлюидов (с образований залежей в ловушках) в пределах вертикальных или крутопадающих зон растяжения (рифтов, грабен-рифтов, участков растяжения в дуплексах растяжения-сжатия сдвиговой тектоники и т.д.). Важным моментом является то, что Колпаковский прогиб с известными потенциально нефтегазоносными структурами западного шельфа Камчатки, изучен не на всю его ширину. Более перспективной может оказаться та часть акватории Охотского моря, которая расположена между Магаданским и Камчатским участками шельфа.

Следует также учитывать буферную роль водоносных пластов в вертикальной миграции УГВ. Примером может быть обоснованный моделированием вывод о возможности наращивания ресурсов Кшукского и Нижне-Квакчикского газоконденсатных месторождений (ГКМ) за счет углеводородных газов, растворенных в водах водоносных горизонтов, вмещающих продуктивные газонасыщенные резервуары [5].

Анализ строения структурных паттернов, проявленных в пространственном распределении морфоструктур и морфоскульптур рельефа земной поверхности, геохимических и геофизических полей, может стать полезным дополнением к традиционным подходам к проведению прогнозно-поисковых работ на УГВ. Наши исследования показывают, что одним из перспективных является Голыгинский НГР.

В пределах Притихооенанской НГП перспективной является Авачинско-Налычевский НГР, границы которого ранее рассматривались нами в связи с отличающийся наличием осевой симметрии в пространственном расположении зон разгрузки термальных вод вокруг Авачинско-Корякской группы вулканов [6]. У подножия вулканов расположены также Радыгинская

потенциально газоносная площадь, газопроявления УГВ у западного и северных подножий Корякского вулкана, а также газо- и нефтепроявления Налычевской впадины.

Мы полагаем, что Богачевское проявление УГВ недоразведано, т.к. пробуренными скважинами не были вскрыты нефтегазопродуктивные коллекторы, расположенные вероятно, в автохтоне надвига, относящегося к системе надвигов Гречишкина. Перспективы наращивания запасов Соболевской группы месторождений следует также связывать с докайнозойскими коллекторами, приуроченными к аллохтону известного здесь надвига.

Структурный контроль многочисленных источников нефти и участков разгрузки эндогенного метана на поверхность Камчатки определяется наличием крутопадающих радиально-концентрических дизъюнктивов вулканоструктур и крупных региональных разломов, вскрывающих коллекторы УГВ на различных глубинах, в том числе расположенных в автохтонах надвигов и тектонических покровов.

Перспективы трансфера знаний и технологий для расширения ресурсной базы водородной энергетики

При газогеохимических исследованиях территории Южной Камчатки, нами были установлены участки с повышенного содержания водорода в пробах почвенного воздуха на перевале между вулканами Корякский и Авачинский, у подножий ряда других вулканов. Отмечаются повышенные содержания молекулярного водорода в пробах воздуха и газов, спонтанно выделяющихся из воды термальных источников. Так, например, количество молекулярного водорода в одной из таких проб, отобранных из воды с температурой (на момент отбора пробы газа) 97 °С в грифоне Кутха Большебанной гидротермальной системы, составило 110×10^{-5} объемных %. Эта концентрация в 22 раза превышает среднее объемное содержание этого газа в атмосфере Земли (5×10^{-5}). Другие проявления эндогенной активности характеризуются еще большими значениями содержания молекулярного водорода. Однако задача типизации естественных источников водорода еще не решена.

Выводы

Расширение ресурсной базы на эксплуатируемых нефтегазоносных площадях с резервуарами, сложенными породами вулканического происхождения, возможно за счет трансфера знаний о современных вулканических областях и технологий изучения вулканических процессов.

Работы по прогнозу нефтегазоносности Камчатки необходимо дополнить: 1) работами по оценке ресурсов углеводородов в пределах считавшихся ранее неперспективными Авачинско-Налычевский и Голыгинский потенциально нефтегазоносными районами; 2) провести на территории Кроноцкого государственного биосферного заповедника комплекс экологически безопасных геолого-геофизических исследований для изучения зон миграции и разгрузки УГВ а также глубинного строения Богачевской нефтегазоносной площади; 3) выполнить исследования условий разгрузки углеводородов на о. Атласова и других островах тыловой части Курильской дуги.

Список литературы

1. Варламов А.И., Афанасенков А.П., Пороскун В.И. Роль количественной оценки потенциальных ресурсов углеводородов Российской Федерации при планировании и проведении геологоразведочных работ на нефть и газ. 2013. М.: ФГУП «ВНИГНИ». 24 с. Электронный ресурс: <http://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/2586.pdf> датирован 17.10.2013.

2. Делемень И.Ф. О возможности прогноза ресурсов углеводородов и подземного тепла в районе архипелага Земля Франца – Иосифа на основе трансфера инновационных геолого-геофизических методов геотопологии и вулканологии. Глобальные проблемы Арктики и Антарктики. Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 90-летию со дня рождения академика Николая Павловича Лавёрова 2 - 5 ноября 2020 г. Архангельск. 2020. 4 с. (в печати).

3. Чикишева Е.В. Особенности геологического строения залежей вулканогенно-осадочных пород триасового комплекса Рогожниковского месторождения. Новые технологии нефтегазовому региону. Материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2010. Тюмень: Издательство: Тюменский индустриальный университет. С. 42–46.

4. Delemen I. Conjectures regarding the fluidmagmatic feeding system's architecture of the Uzon caldera (Kamchatka): some methodological aspects of the geomorphological, geological and geophysical data interpretation, Abstract volume of the 8th International Maar Conference, IVS FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 2020, P. 70–71. ISBN 978-5-902424-31-4, URL: http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/maar19-20/doc/8IMC_Abstract_volume_final.pdf (Дата обращения 08.08.2020)

5. Кирюхин А.В., Воронин П.О. TOUGH2-EWASG-моделирование накопления CH₄ в вулканогенных резервуарах Западной Камчатки. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа» (Geothermal Volcanology Workshop 2019), 4 – 9 сентября 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 136–140.

УДК 550.46(282.257.21)

Organic Matter and Molecular Weight Distribution of Alkanes in Hydrothermal Systems of Kamchatka

Valery A. Poturay

*Institute for Complex Analysis of Regional Problems FEB RAS, Birobidzhan, Russia
poturay85@yandex.ru*

The article presents the results of the study of organic matter in the hydrothermal systems of Kamchatka. 113 organic compounds were identified by gas chromatography-mass spectrometry. The Mutnovskaya, Paratunskaya and Uzonskaya hydrothermal systems were investigated. They are characterized by aromatic and saturated hydrocarbons, carboxylic acids and their esters. The distribution of alkanes indicates their thermogenic genesis in the Mutnovskaya and Paratunskaya hydrothermal systems. In the Uzon geyser, alkanes were formed as a result of chemical re-synthesis of organic residues and bacterial activity.

Keywords: Kamchatka Peninsula, hydrothermal system, organic matter, alkanes, genesis

Органическое вещество и молекулярно-массовое распределение алканов в ряде гидротермальных систем Камчатки

В.А. Потурай

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН, Биробиджан, Россия

В статье приводятся результаты исследования органического вещества средней летучести в гидротермальных системах полуострова Камчатка. Методом газовой хромато-масс-спектрометрии установлено 113 органических соединений в Мутновской, Паратунской и Узонской гидротермальных системах. В этих термальных водах характерны ароматические и предельные углеводороды, карбоновые кислоты и их эфиры. Молекулярно-массовое распределение алканов указывает на их термогенный генезис в Мутновской и Паратунской гидротермальных системах. В Узонском гейзере алканы образовались в результате химического ре-синтеза органических остатков и бактериальной деятельности.

Ключевые слова: полуостров Камчатка, гидротермальная система, органическое вещество, алканы, генезис

Введение

Полуостров Камчатка – это активный вулканический регион, на территории которого находятся множество действующих вулканов и геотермальных месторождений. При этом гидротермальные системы здесь формируются в условиях резкого термоградиентного режима благодаря близкому положению магматического очага к поверхности. Одни из наиболее мощных и высокотемпературных геотермальных районов на полуострове – Мутновский и Паратунский районы и кальдера вулкана Узон. Здесь нами опробованы скважины, вскрывающие высокотемпературный флюид и ряд горячих источников. Отобранные пробы подвергались хроматомасс-спектрометрическому анализу состава органического вещества средней летучести.

В гидротермальных системах возможно абиогенное образование органического вещества (ОВ) в результате протекания химических реакций, которые инициируются высокой температурой, давлением, рН, Eh и составом водовмещающих пород. При этом основная часть органического вещества в горячих источниках – продукт жизнедеятельности и деструкции гипертермофильных микроорганизмов, обитающих в термальных водах. Цель настоящей работы – определить состав среднелетучего органического вещества в горячих источниках и в высокотемпературном флюиде из скважин Мутновской, Паратунской и Узонской гидротермальных систем и выявить генезис установленных органических соединений.

Описание объектов исследования

Мутновский геотермальный район располагается в южной части Восточно-Камчатского вулканического пояса, в 70 км к юго-западу от г. Петропавловска-Камчатского. Он приурочен к верхнемиоцен-плиоценовому-четвертичному Восточному вулканическому поясу Камчатской гидрогеологической складчатой области (Кирюхин и др., 2010). В пределах Мутновского геотермального района находятся три мощных термальных поля – Донное, Дачное, Северо-Мутновское и несколько более мелких. Состав органического вещества был изучен в конденсате пароводяной смеси двух скважин. Опробовалась эксплуатационная скважина № 4Е Мутновской геотермальной электростанции (Дачное поле). Флюид поднимается из глубины 1600–2000 м. Его температура на устье скважины 175 °С, давление 8,1 бара, рН 4. Другая опробованная скважина № 3 в Северо-Мутновском поле является открытой и фонтанирует на высоту до 40–50 м. На выходе температура пароводяной смеси составляет 95 °С, рН 9, а глубина скважины 1800 м. Кроме этого, были опробованы 4 горячих источника – по 2 в Дачном и Донном термальных полях, имеющие кислую реакцию среды (рН 3–3,5). Их температура превышает 90 °С, являясь близкой к точке кипения для соответствующего гипсометрического уровня.

Кальдера Узон занимает западную часть крупной Узон-Гейзерной вулканотектонической структуры. В фундаменте этой структуры залегает толща вулканогенно-осадочных пород плиоцена. В соответствии с пространственным расположением выделяются следующие термальные поля: Восточное, Оранжевое, Северное, район Фумарольного озера и Западное. В пределах Восточного термального поля был опробован гейзер «Шаман». Высота пароводяного столба достигает 7 м, в воде на начальной стадии деятельности наблюдалась заметная примесь глины. Температура ≈ 100 °С, рН 5,8, минерализация 3,7 г/л, воды хлоридно-натриевые (Компаниченко и др., 2016).

Паратунский геотермальный район объединяет целый ряд термопроявлений. Это собственно Паратунское месторождение, которое подразделяется на Верхнепаратунские, Среднепаратунские и Нижнепаратунские источники, а также Банные и Начикинские проявления термальных вод (Чудаев и др., 2000). В данной работе будут рассмотрены термы Северного участка, вскрываемые скважиной № ГК-9. Паратунское месторождение приурочено к продуктивному трещинно-блоковому вулканогенному резервуару в грабене р. Паратунка, мощностью 1200 м. Фундамент включает 4 основные зоны поступления глубинного теплоносителя на Нижнем, Среднем, Северном и Микижинском участках (Кирюхин и др., 2017). Скважина № ГК-9 имеет глубину 1800 м, температура воды достигает

82,5 и давления 1,5 атмосферы. Воды солоноватые, слабощелочные, хлоридно-сульфатные кальциево-натриевые.

Методика исследования

Пробы термальной воды и конденсат пароводяной смеси были отобраны в августе 2009 г. Концентрат органических соединений был получен методом твердофазной экстракции непосредственно на месте отбора проб. Качественный анализ органических соединений осуществлялся методом капиллярной газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией на газовом хроматомасс-спектрометре Shimadzu GCMS-QP2010S в лаборатории КЦЭМП (аналитик – В.Л. Рапопорт). Подробно используемая методика анализа описана в работе (Компаниченко и др., 2016).

Результаты и их обсуждение

Состав органического вещества средней летучести. В скважине № 4Е Мутновской геотермальной электростанции (Дачное поле) был опробован конденсат пароводяной смеси. В конденсате установлено 48 органических соединений, 9 гомологических рядов. Наибольшее распространение имеют ароматические углеводороды (более 60 %), нормальные и изомерные алканы (более 15 %). Также зафиксированы изопрены, серосодержащие и кислородсодержащие углеводороды. Обращает на себя внимание полное отсутствие карбоновых кислот и их эфиров, терпенов и стероидов, соединений явно биогенного происхождения. Другая опробованная скважина № 3 в Северо-Мутновском поле является открытой и фонтанирует на высоту до 40–50 м. В конденсате скважины идентифицировано 22 органических соединения, относящихся к 5 гомологическим рядам. Наиболее типичными здесь являются алканы, занимающие более 30 % от состава всех органических компонентов, ароматические углеводороды (40 %) и спирты. Причем среди ароматических соединений выявлены только соединения с одним бензольным кольцом, а спирты представлены 2-этилгексанолам и соединением, содержащим цикл – циклопентандиолом. Присутствуют также карбоновая кислота (гексадекановая) и кетон – циклопентанон, который также содержит циклическую структуру. В термальных водах горячих источников Мутновского района было установлено 59 органических веществ, которые относятся к 13 гомологическим рядам. Наиболее распространены здесь алканы, ароматические углеводороды, эфиры и терпены.

Кроме этого, была опробована скважина, вскрывающая Северный участок Паратунской гидротермальной системы. Всего здесь установлено 20 органических веществ, принадлежащих 7 гомологическим рядам. Наиболее распространенными рядами здесь являются ароматические углеводороды с одним бензольным кольцом (около 50 %) и алканы (около 20 %). Также здесь найдены ароматические соединения с несколькими бензольными кольцами, кетоны, эфиры, спирты и терпены.

В гейзере «Шаман» Узонской гидротермальной системы обнаружены 54 соединения 10 гомологических рядов. Наиболее характерными являются ароматические углеводороды, карбоновые кислоты и их эфиры. В меньших количествах присутствуют алканы, изоалканы, полициклические ароматические углеводороды, кетоны, альдегиды, спирты и терпены.

Молекулярно-массовое распределение предельных углеводородов в исследуемых гидротермальных системах. Алканы или парафины присутствуют во всех изученных объектах, причем их доля в составе среднелетучего ОВ составляет значительную часть (в среднем около 20 %). В конденсате пароводяной смеси и высокотемпературном растворе из скважин Мутновского и Паратунского районов присутствуют алканы состава $n-C_{10}-C_{28}$, при этом доля алканов $n-C_{10}-C_{14}$ достигает 85 %. Эта группа предельных углеводородов не характерна для живых организмов. Бактерии синтезируют низкомолекулярные нечетные гомологи (Пошибаева, 2015). Углеводороды с короткой цепью $n-C_{10}-C_{14}$ гидротермальной биотой вообще не синтезируются (Шульга и др., 2010). Вероятно, основная часть УВ в конденсате пароводяной смеси и высокотемпературном растворе – это продукт термокаталитического преобразования органических остатков, которые поступили в результате процессов, происходящих в системе вода (пар)–порода (Потурай, 2017; Потурай, Компаниченко, 2019).

Состав алканов в трех термальных источниках Мутновского района (2 в Дачном термальном поле и 1 в Донном) практически совпадают с молекулярно-массовым распределением *n*-алканов в конденсате пароводяной смеси. Здесь присутствует только фракция низкомолекулярных гомологов состава $n\text{-C}_9\text{--C}_{17}$, причем доля алканов $n\text{-C}_{10}\text{--C}_{14}$ достигает 95 % при слабом преобладании нечетных гомологов. Фракция высокомолекулярных гомологов вообще не установлена. Рассчитанные индексы нечетности ($\text{OEP}_{15, 17}$) близки к единице. Все это говорит о схожем механизме образования *n*-алканов в термальных источниках и в конденсате пароводяной смеси Мутновского геотермального района, где их происхождение обязано термогенным процессам. Молекулярно-массовое распределение алканов в четвертом термальном источнике (кипящий грязевой котел Донного фумарольного поля) отличается. Здесь установлена фракция алканов состава $n\text{-C}_{13}\text{--C}_{18}$. Гомологи с короткой ($n\text{-C}_{10}\text{--C}_{12}$) и длинной цепью отсутствуют. Максимум приходится на гомолог $n\text{-C}_{16}$ (гексадекан), а группа характерных фитопланктонных и бактериальных *n*-алканов достигает в сумме 72 %. Это может указывать на преимущественно биогенный генезис УВ здесь, однако, рассчитанные индексы нечетности близки к единице. Высокое содержание $n\text{-C}_{16}$ может быть связано с термокаталитическим превращением биомассы термофилов.

В гейзере Узонской гидротермальной системы максимального значения достигают высокомолекулярные алканы состава $n\text{-C}_{23}\text{--C}_{30}$. Среди *n*-алканов с короткой цепью установлен только додекан ($n\text{-C}_{12}$). При таком массовом преобладании высокомолекулярных гомологов индексы нечетности $\text{OEP}_{25, 27, 29}$ и CPI близки либо равны единице. Это служит фактом в пользу не биогенного происхождения высокомолекулярных УВ, при котором отмечалось бы резкое преобладание нечетных гомологов $n\text{-C}_{25}$, $n\text{-C}_{27}$, $n\text{-C}_{29}$, характерных для восков высших растений. Вероятно, основная часть *n*-алканов с длинной цепью образовалась в результате химического ре-синтеза органических остатков, имевших первичное растительное происхождение (учитывая присутствие почти исключительно высокомолекулярных гомологов). Обращает на себя внимание наличие характерных для бактерий и водорослей групп гомологов, доля которых в сумме достигает 34 %. При этом значение индекса OEP_{23} выше единицы (1,6). Это указывает на биогенное происхождение здесь части *n*-алканов, экстрагированных, вероятно, из водовмещающих толщ (характерные «водорослевые» алканы $n\text{-C}_{21}$, $n\text{-C}_{23}$, $n\text{-C}_{25}$ в сумме до 19 %).

Заключение

В термальных водах и пароводяной смеси Мутновского и Паратунского геотермальных районов и кальдеры Узон выявлены 113 органических соединений, 15 гомологических рядов. Наибольшего распространения в конденсате пароводяной смеси и высокотемпературном растворе из глубоких скважин Мутновского и Паратунского районов достигают предельные и ароматические углеводороды. Распределение алканов (преобладание короткоцепочечных гомологов) указывает на термогенный генезис. В горячих источниках Мутновского района установлен более разнообразный состав органического вещества. Наряду с предельными и ароматическими углеводородами, максимальных концентраций достигают предположительно биогенные компоненты: карбоновые кислоты и их эфиры. Механизм образования алканов здесь схож с таковым во флюиде из глубоких скважин. Гейзер «Шаман», расположенный в кальдере вулкана Узон, характеризуется преобладанием ароматических углеводородов, карбоновых кислот и эфиров. Здесь установлены высокомолекулярные алканы состава $\text{C}_{23}\text{--C}_{30}$, образованные в результате химического ре-синтеза растительных органических остатков. Параллельно с этим процессом в Узонском гейзере часть алканов образуется при возможном участии бактерий и водорослей.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Условия формирования и моделирование эксплуатации Паратунского геотермального месторождения (Камчатка) // *А.В. Кирюхин, Н.П. Асаулова, Л.А. Ворожейкина и др.* // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2017. № 3. С. 16–30.

2. *Кирюхин А.В. / А.В. Кирюхин, В.А. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин. Гидрогеология вулканогенов СПб.: Наука, 2010. 395 с.*

3. *Компаниченко В.Н. Органические соединения в термальных водах Мутновского района и кальдеры Узон /В.Н. Компаниченко, В.А. Потурай, Г.А. Карнов //Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 35–50, DOI: 10.7868/S0203030616050035.*

4. *Потурай В.А. Состав и распределение н-алканов в азотных термах Дальнего Востока России Тихоокеанская геология. 2017. Том 36, № 4. С. 109–119.*

5. *Потурай В.А. Состав и распределение предельных углеводородов в термальных водах и пароводяной смеси Мутновского геотермального района и кальдеры Узон (Камчатка) / В.А. Потурай, В.Н. Компаниченко // Геохимия. 2019. № 1. С. 79–88, DOI: 10.31857/S0016-752564179-88.*

6. *Пошибаева А.Р. Биомасса бактерий как источник углеводородов нефти. дис. канд. хим. наук. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. 124 с.*

7. *Чудаев О.В. / О.В. Чудаев, В.А. Чудаева, Г.А. Карнов, и др. Геохимия вод основных геотермальных районов Камчатки Владивосток: Дальнаука, 2000. 162 с.*

8. *Шульга Н.А. Изучение состава н-алканов в образцах гидротермальных отложений Срединно-Атлантического хребта с помощью метода газовой хроматографии/масс-спектрометрии / Н.А. Шульга, В.И. Пересыпкин, И.А. Ревельский // Океанология. 2010. Т. 50, № 4. С. 515–523.*

УДК 551.311.8; 615.327

**Salt lakes and mud volcanoes of the Crimea
as objects of scientific research
in the course of field practice of students of St. Petersburg state University**

Mikhail Puzyk¹, Elena Kayukova², Victoria Matyunina²

¹*Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia
puzyk@mail.ru*

²*St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

Crimea is a testing ground for a variety of practices, which are an essential element in the training of modern specialists in the natural sciences of various universities. The paper presents the results of studies of brine of salt lakes and bottom sediments carried out by students during field excursions of St. Petersburg universities.

Keywords: Crimean Peninsula, mud volcanoes, salt lakes

**Соляные озера и грязевые вулканы Крыма
как объекты научных исследований
в ходе полевых практик студентов СПбГУ**

М.В. Пузык¹, Е.П. Каюкова², В.А. Матюнина²

¹*РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Полуостров Крым – естественнонаучный полигон для проведения разноплановых учебных и учебно-производственных практик, являющихся важнейшим элементом подготовки современных специалистов естественнонаучных направлений различных вузов. В работе представлены результаты исследований рапы соляных озер и донных отложений, проводимых студентами во время полевых экскурсий Санкт-Петербургских университетов.

Ключевые слова: Крымский полуостров, полевые практики, соляные озера

Природное многообразие Крыма (доступность многочисленных природных объектов, расположенных на небольшой территории) делает полуостров привлекательным в естественнонаучном отношении полигоном. Неспроста именно на Крымском полуострове многие годы проводили свои учебные и учебно-производственные практики многие вузы России и зарубежья – МГУ, СПбГУ, МГГА, РГПУ им. А.И. Герцена, вузы Украины, Белоруссии, Польши, Германии, Норвегии и др.

В сентябре 2017 г. на V-ой международной конференции «Полевые практики в системе высшего образования», посвященной 65-летию учебной геолого-съёмочной практике Санкт-Петербургского государственного университета, обсуждались проблемы полевых и производственных практик высших учебных заведений России. Не секрет, что наметился тренд на сокращение полевых практик в программах подготовки бакалавров и магистров. Тем не менее, полевые практики – важнейший элемент подготовки современных специалистов (бакалавров, магистров) естественнонаучных специальностей. Важность полевых экскурсий для образования и подготовки научных кадров очевидна.

По итогам работы конференции была принята резолюция. В ней отразились положения, представленные в Стратегии развития геологической отрасли до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства РФ № 1039-р от 21.06.2010 г. Основная цель этих практик – приобретение студентами навыков самостоятельной работы в условиях реальной производственной обстановки, реализация знаний и умений, полученных ими на теоретических курсах и практических занятиях в аудиториях университета.

Соляные озера и грязевые вулканы широко распространены на Крымском полуострове (Рис. 1). Эти природные объекты, с одной стороны, – великолепный учебный материал, а с другой – предмет первых научных работ студентов. В ходе летних полевых учебных и учебно-производственных практик (2012–2019 гг.) преподавателями и студентами геологического факультета СПбГУ и географического факультета РГПУ им. А.И. Герцена изучались химический состав рапы некоторых соляных озёр (Сасык-Сиваш, Сакское, Караджинское, Кояш, Чокрак) (Пузык и др., 2014), озерное осадконакопление (Веселова и др., 2014), грязевые вулканы Керченского полуострова (Каюкова, 2018), пелоиды крымских соляных озер (Каюкова и др., 2017; Котова и др., 2015; Котова и др., 2017), подземные и поверхностные воды.



Рисунок 1 – Схема размещения участков опробования

На рис. 1 показаны крымские соляные озера, которые изучались студентами в процессе производственной практики. Минерализация озёрной рапы варьирует в широких пределах 197-342 г/л, рН изменяются в небольшом интервале 7,5 – 8,6. По преобладающим компонентам озёрная рапа в основном относится к сульфатно-хлоридному магниевонариевому типу, по классификации Сулина – к хлор-магниевому. По классификации Курнакова-Валяшко исследованные соляные озера – к хлоридно-магниевому подтипу сульфатного типа. Основными макрокомпонентами, формирующими химический состав рапы, являются ионы хлора, натрия (рис. 2). Концентрации макрокомпонентов: для анионного состава $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$; для катионного состава $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$.

Преобладающие соли большинства озёр – хлориды натрия и магния, а также сульфат магния. Значительный вклад в питание озёр вносит морская вода, фильтрующаяся через пересыпь, остальная часть питания обусловлена подземными водами и инфильтрацией атмосферных осадков. Содержание NaCl в озёрах Евпаторийской группы варьирует в пределах 12,2 – 15,3 вес.%, в озёрах Керченской группы – 16,5 – 21,3 вес. %. Озера Евпаторийской группы обеднены хлоридом натрия по сравнению с озёрами Керченской группы потому, что в них до сих пор ведется активная добыча соли для хозяйственных нужд.

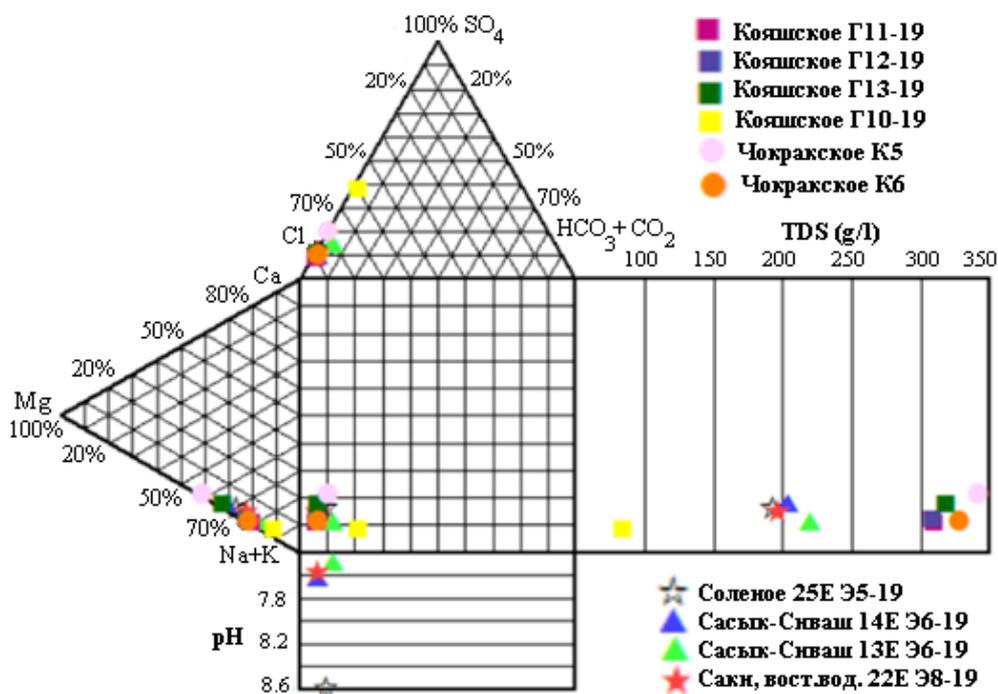


Рисунок 2 – Диаграмма Дурова рапы соляных озёр морского генезиса (2019 г.)

По Курнакову все рассмотренные озёра относятся к первому классу (Валяшко и др., 1953, Кузнецов, 1997), что указывает на их морское происхождение. Рассчитанные коэффициенты метаморфизации рапы варьируют в пределах 0,49 – 1,34. Для этих озёр прослеживается тенденция к увеличению коэффициента метаморфизации с течением времени. Это повышение может быть связано с распреснением озёр, обильным вкладом подземных вод, обогащенных сульфатами.

Анализ геохимических модулей в отложениях Сакского озера показал, что значение индекса химического выветривания (CIA) для всей толщи не превышает 60 единиц, что указывает на аридный климат суши во время формирования данной толщи. Повышенное значение Fe/Mn-коэффициента наблюдается на глубинах 60-90 и 485-500 см, что указывает на обмеление и опреснение бассейна по сравнению с толщиной на глубине 90-485 см. Отношение Ba/Sr имеет свои максимумы на тех же глубинах (что и для Fe/Mn). Это указывает на существенно более пресноводные условия формирования данной толщи. Анализ геохимических модулей в отложениях Караджинского озера показал повышение индекса CIA на глубинах 520-550 см и 580-670 см, что указывает на изменение климата в

сторону гумидизации, а при формировании толщи 150-550 см – на аридные условия (Веселова и др., 2014).

Геохимические особенности донных отложений Караджинского озера схожи с закономерностями Сакского озера: формирование толщи осадков в преимущественно аридных климатических условиях, постепенное обмеление и опреснение бассейнов, на что указывают отношения Fe/Mn и Ba/Sr в основании разрезов. Согласно выявленным геохимическим особенностям реалистичной будет гипотеза о существовании двух этапов осадконакопления аквальных геосистем на территории западного Крыма. Первый этап – формирование толщи осадков в мелководных условиях, когда рассматриваемые водоемы представляли заливы Черного моря. Второй этап – существование озер как обособленных от морского бассейна систем, формирующихся до настоящего времени в качестве внутриконтинентальных водоемов с полной потерей связи с Черным морем.

Гидрохимический анализ макрокомпонентов выполнялся в полевой лаборатории на базе СПбГУ в д. Трудюловке и в гидрохимической лаборатории кафедры гидрогеологии СПбГУ. В лабораториях РГПУ им. А.И. Герцена был проведен анализ плотности рапы и некоторых проб жидкой фазы грязевых вулканов, а также геохимические исследования на рентгенофлуоресцентном спектрометре «Спектроскан МАКС-GV».

Авторы выражают благодарность РЦ СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» и «Обсерватория экологической безопасности» за изучение изотопного состава рапы соляных озер и сопочных вод, а также микрокомпонентов в сопочных и других природных водах Крыма.

Список литературы

1. *Валяшко М.Г.* Исследование физико-химических свойств солей и соляных растворов / *М.Г. Валяшко, А.А. Нечаева, Г.К. Пельш;* Под ред. В.В. Вязовой, Е.Ф. Соловьевой. Ленинград, Москва, 1953.
2. *Веселова М.А.* Палеогеохимические реконструкции условий озерного осадконакопления на западе степного Крыма / *М.А. Веселова, Д.А. Морозов, Е.М. Нестеров и др.* // Геология, геоэкология, эволюционная география. Том XII. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2014. С. 110–114.
3. *Каюкова Е.П.* Химический состав жидкой фазы грязевых сопоч северо-восточной части Керченского полуострова (Восточный Крым) // Геология, геоэкология, эволюционная география. Том XVII. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2018. С. 186–190.
4. *Каюкова Е.П.* Лечебные ресурсы Булганакского месторождения (Восточный Крым). / *Е.П. Каюкова, Н.В. Платонова, Б.Д. Чадромцев* // Материалы V Всероссийской конференции «Полевые практики в системе высшего образования». СПб.: ВВМ, 2017. С. 157–159.
5. *Котова И.К.* Закономерности формирования состава иловых грязей Мертвого моря и соляных озер Крыма / *И.К. Котова, Е.П. Каюкова, Л.В. Мордохай-Болтовская и др.* // Вестник С.-Петербург. ун-та. Сер. 7. 2015. Вып. 2. С. 85–107.
6. *Котова И.К.* Влияние геологических и антропогенных факторов на состав пелоидов современных соляных озер / *И.К. Котова, С.Р. Котов, Е.П. Каюкова и др.* // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2017. Том 62. Выпуск 2. С. 172–191, DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.204.
7. *Кузнецов В.А.* Роль ионного обмена при формировании подземных вод и рассолов. Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 1997. 177 с.
8. *Пузык А.М.* Исследование вод некоторых озер Крыма / *А.М. Пузык, Е.М. Нестеров, М.В. Пузык* // Геология, геоэкология, эволюционная география. Том XII. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2014. С. 245–247.

TOUGH2 modeling of complex-built reservoir of the Metejan water-methane field

Aynur S. Bayramova

*Saint Petersburg State University, Institute of Earth sciences, Saint Petersburg, Russia
aynurbayramowa1610@mail.ru*

The analysis of the conditions of formation and operation history of the Metejan gas field is performed. The conceptual hydrodynamic model of the reservoir, which includes subhorizontal productive faults in blocks of low-permeable enclosing rocks, is substantiated. To analyze the operation of a single vertical well using the PetraSim graphical interface, the base TOUGH2-EWASG model has been prepared.

Keywords: PetraSim, modeling, TOUGH2, EWASG, Metejan

TOUGH2-моделирование сложно-построенного резервуара Метеджанского водно-метанового месторождения

А.С. Байрамова

*Санкт-Петербургский Государственный Университет, Институт Наук о Земле, Санкт-Петербург,
Россия*

Выполнен анализ условий формирования и истории эксплуатации Метеджанского газового месторождения. Обоснована концептуальная гидродинамическая модель резервуара, включающего субгоризонтальные продуктивные разломы в блоках низкопроницаемых вмещающих пород. Для анализа эксплуатации одиночной вертикальной скважины с использованием графического интерфейса PetraSim подготовлена базовая TOUGH2-EWASG модель.

Ключевые слова: PetraSim, моделирование, TOUGH2, EWASG, Метеджан

Введение

Метеджанское месторождение и все близлежащие ловушки, выявленные залежи является высокоперспективным для последующей добычи углеводородов на территории Приамударьинского района.

Однако они отличаются сложностью геологического строения, относительно трудными технико-технологическими условиями бурения скважин (несмотря на неглубокое залегание продуктивного комплекса) и недостаточной на сегодняшний день для разработки изученностью.

При моделировании сложно-построенного резервуара Метеджанского водно-метанового месторождения были использованы программы Surfer и PetraSim. Для моделирования используется программа TOUGH2 с модулем состояния EWASG. Модуль состояния разработан для моделирования резервуаров, насыщенных минерализованными флюидами и неконденсирующимися газами, включая CH₄.

Анализ распределения давлений в резервуаре: порового, литостатического и гидроразрыва. Выявление активных и продуктивных разломов на исследуемой территории

На рис. 1 показано график зависимости порового (Pp), вертикального стресса (Sv) или литостатического давления, давления гидроразрыва (построены по данным таблицы из отчета «Дополнение к технологической схеме разработки Метеджанского месторождения газа», 2011). Из рисунка видно, что давление гидроразрыва практически равно Sv. Отсюда вытекает, что резервуар находится в условиях горизонтального сжатия, поэтому SHmax рассчитан по формуле, соответствующей условиям горизонтального сжатия (Кирюхин А.В., в печати):

$$\frac{SH_{max}-Pp}{Sv-Pp} = (\sqrt{(1 + \mu^2)} + \mu)^2. \text{ При } \mu = 0,6 \text{ выражение } (\sqrt{(1 + \mu^2)} + \mu)^2 = 3,1 \quad (1)$$

На рис. 1 видно, что гидроразрыв наиболее актуален в интервалах от 2550 м до 2850 м.

График зависимости порового давления, SH_{min} и S_v от глубины, МПа

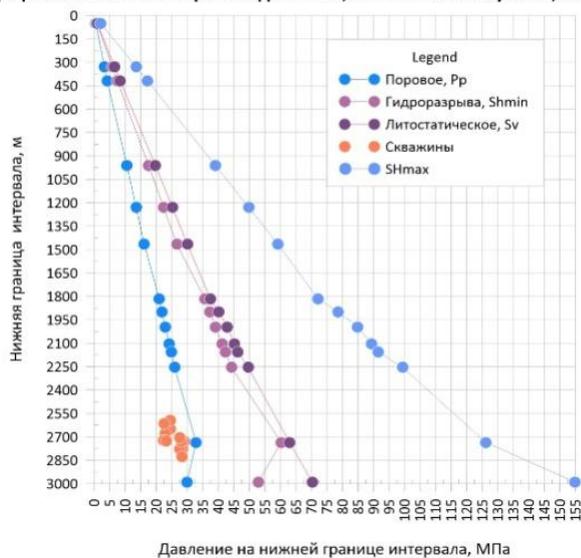


Рисунок 1 – График зависимости порового давления, давления гидроразрыва, S_v и SH_{max} от глубины по данным отчета «Дополнение к технологической схеме разработки Метеджанского месторождения газа», 2011

Все скважины наиболее близки к условиям формирования естественного коллектора за счет условий гидроразрыва. Близкие значения вертикального стресса (литостатического давления) и давления гидроразрыва указывают на геомеханические условия горизонтального сжатия (RF) что соответствует горизонтальным трещинам гидроразрыва. Таким образом механизм формирования газовых ловушек может быть связан с естественным процессом

формирования горизонтальных трещин (разломов) в массивных известняках. Это подтверждается также анализом региональной сейсмичности и распределения продуктивных зон, выполненных с использованием программы Frac-Digger.

Анализ региональной сейсмичности (данные из Международного сейсмологического центра ISC) проиллюстрированы стереограммой и гистограммами:

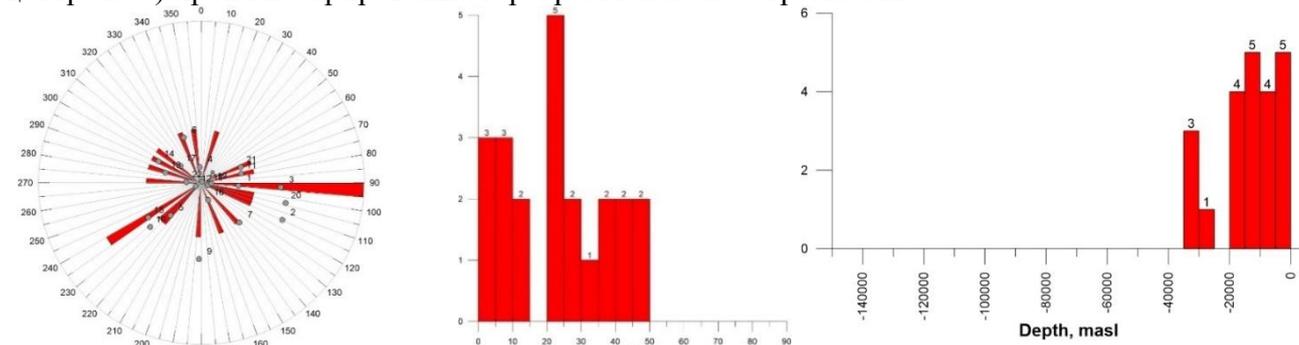


Рисунок 2 – Сейсмогенные разломы Туркменистана. Стереограмма (угол и азимут падения) и гистограммы распределения по углу падения, глубине

Для построения этих графиков использованы результаты Frac-Digger-анализа регионального каталога сейсмических данных ISC (International Seismological Center), включающих 578 землетрясения с 1963 по 2019 гг, которые позволили выявить 22 сейсмогенных разлома на рассматриваемой территории. Большая часть сейсмогенных разломов характеризуется субгоризонтальным (углы падения от 0 до 15 град) или пологим залеганием (углы падения от 20 до 50 град), что соответствует геомеханическим условиям горизонтального сжатия. Это позволяет охарактеризовать геомеханические условия как условия горизонтального сжатия (RF, reverse fault conditions, с минимальным вертикальным стрессом и условиями благоприятными для формирования горизонтальных трещин гидроразрыва). Таким образом данные по региональной сейсмичности согласуются с локальными геомеханическими условиями, которые отражены на рис. 1.

TOUGH2-EWASG-моделирование (базовая модель #1)

Расчет на модель сделано в программе Surfer. Базой послужила рисунок месторождения Метеджан, точнее структурная карта по отражающему горизонту в кровле ангидридовой пачки по данным сейсморазведки ЗД. В этой программе были добавлены точки всех скважин по координатам, пробуренных в этой месторождении (Рис. 3).

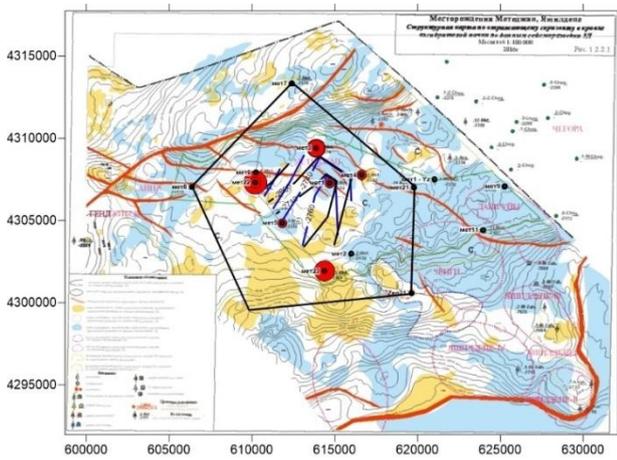


Рисунок 3 – Карта месторождения с продуктивными скважинами, сделано в программе Surfer

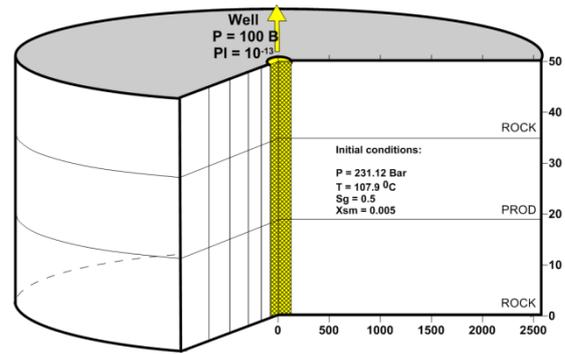


Рисунок 4 – Концептуальная модель продуктивного субгоризонтального резервуара внутри массива вмещающих пород

На модели рассматриваются варианты эксплуатации субгоризонтального продуктивного резервуара мощностью 17 м внутри толщи Келловей-оксфордский яруса (J3k-o) с общей мощностью 50 м. Указанная ситуация геометрически может соответствовать эксплуатации одиночной добычной скважины трехслойного резервуара в условиях радиально-цилиндрического потока (Рис. 4).

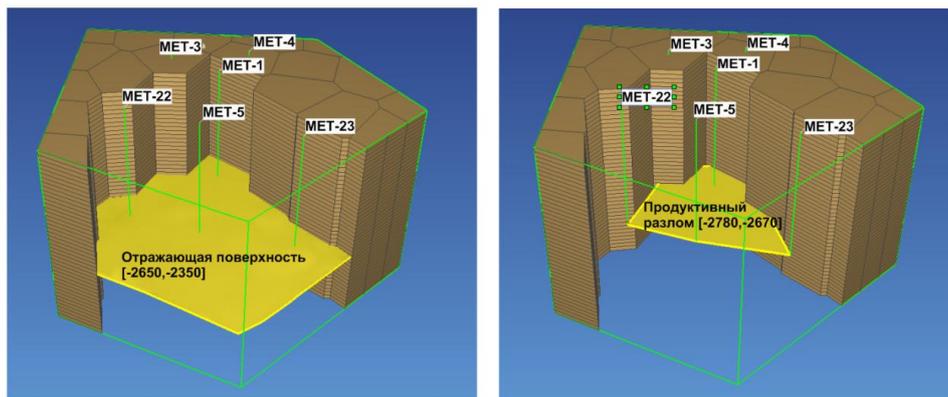


Рисунок 5 – Продуктивный субгоризонтальный разлом (включает 12 продуктивных зон (по данным скважин), угол падения $0,5^\circ$) выявлен с помощью программы Frac-Digger, он залегает глубже на 200 м по отношению к отражающей поверхности, установленной по результатам 3D сейсморазведки. Его поверхность также изображена с использованием программы Surfer на рис. 3

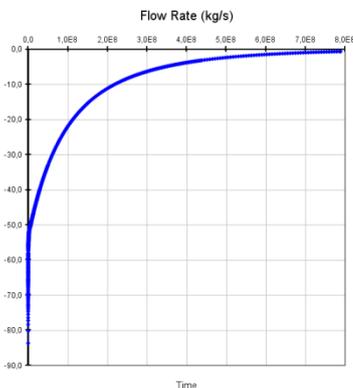


Рисунок 6 – Результаты моделирования (базовая модель): расход газа (кг/с) продуцируемый скважиной

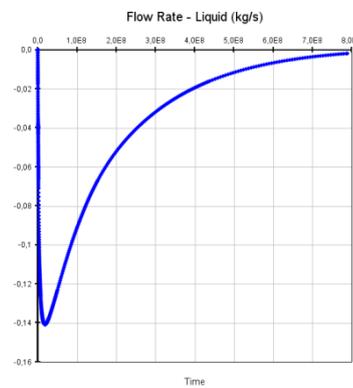


Рисунок 7 – Результаты моделирования (базовая модель): расход воды (кг/с) продуцируемый скважиной

TOUGH2-EWASG-моделирование (базовая модель #3)

Результаты моделирования по базовой модели #1 не воспроизводят наблюдаемого преобладания воды в продукции скважин, которые показывают, что массовая доля газа составляет от 5 до 15%. Поэтому базовая модель #1 была преобразована в базовую модель #3: (1) На модели отключены нижний и верхний непроницаемые слои; (2) Начальное насыщение газовой фазы задано 0,1.

После этого были заново сгенерированы начальные условия методом прогона гравитационного равновесия и выполнен прогон на срок эксплуатации 5 лет, соответствующий истории эксплуатации месторождения. Результаты моделирования истории эксплуатации показаны на рис. ниже. Рис. 8 показывает более сопоставимые результаты моделирования с историей эксплуатации, необходимо продолжение углубленного исследования для воспроизведения на модели истории эксплуатации и прогноза возможных дальнейших сценариев эксплуатации месторождения.

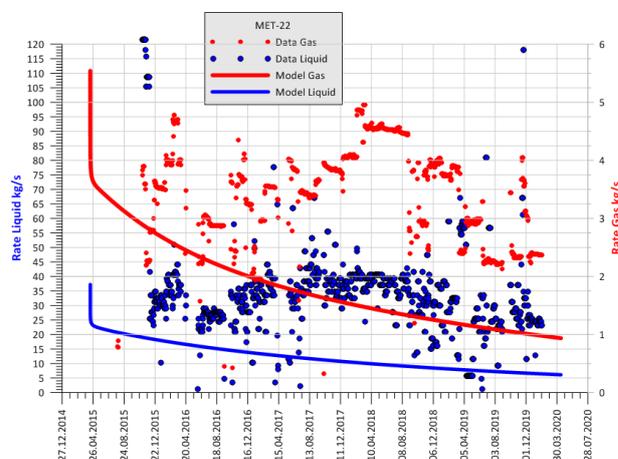


Рисунок 8 – Результаты моделирования истории эксплуатации базовой модели #3

Заключение

Показано, что механизм формирования газовых ловушек может быть связан с естественным процессом формирования горизонтальных трещин (разломов) в массивных известняках. Это подтверждается также анализом региональной сейсмичности и распределения продуктивных зон, выполненных с использованием программы Frac-Digger.

Обоснована концептуальная гидродинамическая модель резервуара, включающего субгоризонтальные продуктивные разломы в блоках низкопроницаемых вмещающих пород.

Для анализа эксплуатации одиночной вертикальной скважины с использованием графического интерфейса PetraSim подготовлена базовая TOUGH2-EWASG модель #1. С использованием моделирования выполнен прогноз эксплуатации добычной скважины в круговом пласте с параметрами, соответствующими Метеджанскому газовому месторождению.

Дальше было воспроизведено калибровка базовой модели #3 по данным истории эксплуатации, где результат показал более сопоставимые результаты моделирования с историей эксплуатации.

Список литературы

1. Геология СССР. Том 22. Туркменская ССР. Часть 1. Геологическое описание М.: ГНТИ литературы по геологии и охране недр. 1972. 659 с.
2. Кирюхин В.А. Региональная гидрогеология. Учебное пособие СПб.: СПГТУ, 2005. 344 с.
3. Кирюхин П.А., Кирюхин А. В. Frac-Digger. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612168 от 21.06.2016 / П.А. Кирюхин, А.В. Кирюхин
4. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем СПб.: Эко-Вектор. 431 с.
5. Отчет «Дополнение к технологической схеме разработки Метеджанского месторождения газа». 2011. С. 1–57.
6. <http://www.thunderheadeng.com/petrasim/petrasim-resources>
7. Pruess K. A practical method for modeling fluid and heat flow in fractured porous media / K. Pruess, T.N. Narasimhan // Society of Petroleum Engineers Journal, 1985. № 25. P. 14–26.

CHAPTER VIII. MECHANISM OF GEYSERS AND OTHER CYCLIC PHENOMENA IN HYDROTHERMAL SYSTEMS

РАЗДЕЛ VIII. МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГЕЙЗЕРОВ, ЦИКЛИЧЕСКИЕ И ДИАГЕНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

УДК556.013+544.344.3

The Role of Bicarbonate and pH of Solutions in the Eruption of the Shaman Geyser (Kamchatka, Russia)

Anastasiya V. Sergeeva¹, Alexey V. Kiryukhin^{1,2}, Tatiana V. Rychkova¹

¹*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
anastavalers@gmail.com*

²*Kronotsky State Biosphere Reserve, 48 Ryabikova, Elizovo 684000, Russia*

Studied the dependence of the solubility of carbon dioxide on pH and temperature in the waters that feed the Shaman geyser (Caldera Uzon, Kronotsky Reserve, Kamchatka, Russia). The calculation shows that in solutions with an HCO_3^- concentration of about 10^{-3} mol/L and a pH of about 5, carbon dioxide begins to be released at a temperature of about 80 °C or higher. The partial pressure of carbon dioxide becomes comparable to atmospheric. This contributes to the eruption of the Shaman geyser.

Keywords: hydrocarbonate, geysers eruption, Uzon Caldera

Роль гидрокарбонат-иона и pH раствора в извержении гейзера Шаман (Камчатский Край, Россия)

А.В. Сергеева¹, А.В. Кирюхин^{1,2}, Т.В. Рычкова¹

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия*

²*ФГБУ «Кроноцкий государственный заповедник», ул. Рябикова, Elizovo, 684000, Россия*

В работе исследована растворимость CO_2 в зависимости от pH и температуры применительно к растворам гейзера Шаман (Мутный), который расположен в кальдере Узон, на территории Кроноцкого заповедника, в Камчатском Крае. Расчеты показали, что при концентрации гидрокарбонат-иона порядка 10^{-3} моль/л и pH около 5, углекислота начинает выделяться уже около 80 °C. Парциальное давление углекислого газа достигает величин, сравнимых с атмосферным давлением, в диапазоне 80 – 100 °C, и это способствует извержению.

Ключевые слова: гидрокарбонат, извержение гейзеров, кальдера Узон

Введение

Модели функционирования гейзеров отражают вариативность механизмов, приводящих к циклическим извержениям (Kiryukhin et al, 2020; Sergeeva et al, 2019). Гейзер Шаман, расположенный в кальдере Узон (Камчатка, Россия), молодой и формировался в течение нескольких лет, что позволило наблюдать за установлением его режима, циклическостью изменений температуры, отследить изменение состава термального раствора. В работе (Kiryukhin et al, 2020) приведены составы термальных вод гейзера Шаман с тех пор, как он начал извергаться в циклическом режиме. За несколько лет гейзер проработал свой канал, вокруг которого сформировались гейзеритовые отложения. Стоит отметить, что площадка, на которой расположен гейзер, содержит следы и более ранних гейзеров. Остатки ранних гейзеров выглядят как округлые ванны с углублением посередине, по бортам

которых располагаются характерные гейзеритовые отложения. В настоящее время все старые каналы забиты аллювиальными отложениями.

Воды гейзера Шаман близки к нейтральным и слабокислые, видимо, pH обусловлен равновесием $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2(\text{раствор}) = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$. При относительно невысоких pH растворимость углекислого газа резко падает. В связи с этим представляет интерес расчет давления CO_2 в растворах гейзера Шаман в ходе всего цикла извержения, который включает перезарядку резервуара гейзера, нагревание раствора, увеличение давления в канале и, собственно, извержение. В настоящей работе на основании данных о составе разгружающихся вод гейзера Шаман проводится расчет давления углекислого газа в зависимости от температуры и pH.

Методика расчета

Расчет ведется по схеме, включающей следующие блоки.

1. Определение зависимости растворимости CO_2 от pH, с учетом равновесий, в которых принимает участие углекислота. Зависимость растворимости CO_2 от pH определяется участием углекислоты в следующих равновесиях: $\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$, $\text{H}_2\text{CO}_3 = 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$. Соответственно, чем выше pH, тем выше растворимость углекислоты в растворе.

2. Определение зависимости $p(\text{CO}_2) = k(T)[\text{CO}_2]$ между парциальным давлением CO_2 и молярной концентрацией $[\text{CO}_2]$ в растворе при различных температурах, где $k(T)$ – коэффициент Генри. На этом этапе используются справочные данные по растворимости CO_2 в различных условиях.

Нахождение зависимости коэффициента Генри $k(T)$ от температуры по найденным коэффициентам для растворения CO_2 при различных температурах.

По данным о содержании $[\text{HCO}_3^-]$ и pH растворов гейзера Шаман выполняется расчет концентрации $[\text{CO}_2]$ в растворе для каждого конкретного состава, полученного в результате лабораторного анализа водных образцов.

Вычисление зависимости $p(\text{CO}_2)$ от температуры для реальных растворов, с использованием ранее найденных значений $[\text{CO}_2]$ и $k(T)$, определение значения $p(\text{CO}_2)$ при 60–100 °С.

Результаты и обсуждение

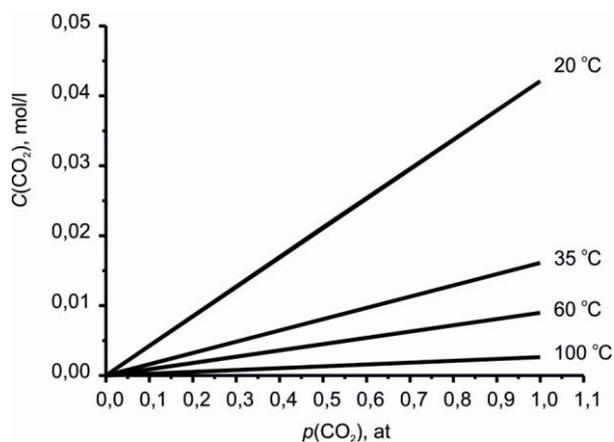


Рисунок 1 – Связь аналитической концентрации углекислоты и парциального давления CO_2

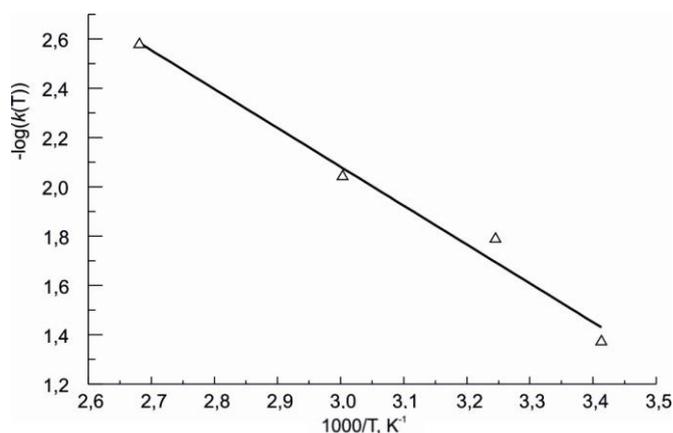


Рисунок 2 – Температурная зависимость коэффициента Генри для растворения CO_2 в аррениусовских координатах

На рис. 1 представлены кривые, отражающие зависимость парциального давления углекислоты и молярной концентрации CO_2 . В области малых давлений эти зависимости близки к линейным и описываются уравнением $p(\text{CO}_2) = k(T)[\text{CO}_2]$. В свою очередь, зависимость $k(T)$ спрямляется в аррениусовских координатах (рис. 2), и описывается уравнением $-\log[k(T)] = 6,81 - 1,58 \times 10^3/T$. Теперь, зная pH раствора, концентрацию гидрокарбоната и температуру, можно рассчитать давление CO_2 , выделяющегося по

равновесию: $2\text{HCO}_3^- (\text{раствор}) = \text{CO}_2(\text{газ}) + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-}$. Стоит отметить, что в результате разложения HCO_3^- pH раствора должен повышаться.

В табл. 1 приведены значения парциальных давлений углекислого газа для различных температур, при указанных значениях pH и $[\text{HCO}_3^-]$ (Kiryukhin et al, 2020).

Таблица 1. Парциальное давление (атм.) CO_2 для термальных растворов гейзера Шаман

| | Концентрация, моль/л | | Температура раствора, °C | | | | |
|-----|-----------------------|-----------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | 20 | 60 | 70 | 80 | 100 |
| pH | $[\text{HCO}_3^-]$ | $[\text{CO}_2]$ | Парциальное давление CO_2 , атм, | | | | |
| 6,3 | $6,23 \times 10^{-4}$ | $6,99 \times 10^{-4}$ | 0,019 | 0,083 | 0,115 | 0,155 | 0,268 |
| 6,1 | $9,02 \times 10^{-4}$ | $1,60 \times 10^{-3}$ | 0,043 | 0,191 | 0,262 | 0,354 | 0,614 |
| 4,7 | $1,64 \times 10^{-4}$ | $7,32 \times 10^{-3}$ | 0,197 | 0,873 | 1,200 | 1,620 | 2,810 |
| 5,6 | $3,44 \times 10^{-4}$ | $1,94 \times 10^{-3}$ | 0,052 | 0,231 | 0,318 | 0,429 | 0,745 |
| 5,5 | $1,97 \times 10^{-5}$ | $1,39 \times 10^{-4}$ | 0,004 | 0,017 | 0,023 | 0,031 | 0,053 |
| 5,2 | $9,84 \times 10^{-5}$ | $1,39 \times 10^{-3}$ | 0,037 | 0,166 | 0,228 | 0,308 | 0,534 |
| 5,9 | $1,11 \times 10^{-3}$ | $3,14 \times 10^{-3}$ | 0,085 | 0,375 | 0,515 | 0,695 | 1,206 |
| 6,9 | $9,18 \times 10^{-4}$ | $2,59 \times 10^{-4}$ | 0,007 | 0,031 | 0,042 | 0,057 | 0,099 |
| 6,3 | $6,23 \times 10^{-4}$ | $6,99 \times 10^{-4}$ | 0,019 | 0,083 | 0,115 | 0,155 | 0,268 |

Как видно из таблицы, в некоторых случаях давление CO_2 достигает более 0,5 атм (значения выделены жирным шрифтом) уже при температуре 60 – 70 °C. Чем ниже pH и выше концентрация гидрокарбоната, тем выше давление CO_2 при прочих равных, например, при одинаковой температуре. Подчеркнем, что речь идет только о том CO_2 , который образуется в результате разложения гидрокарбоната, приток глубинного CO_2 здесь не учитывается.

Выводы

1. Если pH понижается, даже незначительно, то при одном и том же содержании гидрокарбонатов содержание CO_2 в растворе может измениться примерно на порядок. Соответственно, при понижении pH ожидается сокращение периодов извержений, т.к. давление CO_2 над раствором в канале гейзера при температурах 80 – 100 °C, а иногда и при 60 °C, становится сравнимым с давлением атмосферы.

2. Разбавление растворов метеорными водами приводит к ожидаемому снижению содержания гидрокарбоната, в этом случае гейзер может перейти в режим пульсирующего источника. В режиме пульсирующего источника канал гейзера заполняют растворы с близонейтральным pH и содержанием гидрокарбоната менее 6 мг/л. В более общем случае для перехода в режим пульсирующего источника молярная равновесная концентрация гидрокарбоната до извержения должна удовлетворять неравенству $[\text{HCO}_3^-] < 10^{(\text{pH}-1)}$. Тогда даже при нагревании не выделяется такое количество газа, которое было бы достаточно для извержения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту 18-05-00052.

Список литературы

1. Kiryukhin A.V. Simulating the Conditions of Generation for Permeable Geyser Channels in Areas of Acid Volcanism / A.V. Kiryukhin, T.V. Rychkova, A.V. Sergeeva // Journal of Volcanology and Seismology. 2020. Vol. 14, no. 2. P. 71–82, DOI: 10.1134/S0742046320020037.
2. Kiryukhin A.V. A CO_2 -Driven Gas Lift Mechanism in Geyser Cycling (Uzon Caldera, Kamchatka) / A.V. Kiryukhin, G. A. Karpov // Geosciences. 2020. Vol. 10. No.5, DOI: 10.3390/geosciences10050180.
3. Sergeeva, A. Secondary minerals in the geysers of the Geysers Valley (Kamchatka). E3S / A. Sergeeva, A. Kiryukhin // Web of Conferences. 2019, № 98, DOI: 10.1051/e3sconf/20199808019.

Surface indicators of activation of the deep feeding zone of modern caldera hydrothermal systems

Gennady A. Karpov

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
karpovga@kscnet.ru*

The conditions for the development of phreatic explosive processes in modern thermal fields of high-temperature caldera hydrothermal systems are considered by examples of a number of thermal fields.

Keywords: phreatic explosion, hydrothermal system, indicator

Поверхностные индикаторы активизации зоны глубинного питания современных кальдерных гидротермальных систем

Г.А. Карпов

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия

На примерах ряда термопроявлений рассмотрены условия развития фреатических взрывных процессов на современных термальных полях высокотемпературных кальдерных гидротермальных систем.

Ключевые слова: фреатический взрыв, гидротермальная система, индикатор

Современные высокотемпературные гидротермальные системы в областях активного вулканизма обычно локализованы в пределах грабенных или кальдерных структур (Hedenquist, Henle, 1985; Henle, 1986; Аверьев, Сугробов, 1967; Карпов, 1988; Кирюхин и др., 2010).

Геологические и геофизические исследования подтверждают предположение о наличии крупных батолитов в частично расплавленном состоянии в верхних горизонтах земной коры, например, в кальдере Йеллоустон, вмещающей одну из крупнейших в Мировых современных гидротермальных систем (Eaton et al., 1975). Обычно в таких кальдерах последним актом магматической деятельности являются экзтрузии кислого состава (дациты, риолиты), с выбросами значительных масс пемзы. Такую историю геологического развития имеет и кальдера Узон на Камчатке (Карпов, 1988). Считается, что эти магматические батолиты (или интрузивные тела) длительное время продуцируют мощные флюидные потоки, которые и питают современные гидротермальные системы, характеризующиеся выходами кипящих гидротерм, гейзеров и грязевых вулканчиков. Для поверхностного выражения таких гидротермальных систем характерны также разного размера озера, заполненные горячей водой.

Мы связываем их образование с фреатическими взрывами. Так, установлено, что в термальной зоне Таупо (Новая Зеландия) в районе крупного озера Шампейн-Пул, в результате таких фреатических взрывов (Хеденквист называл их гидротермальными), которые имели место порядка 900 лет назад, были сформированы кратеры диаметром до 250 м. В настоящее время это озеро, заполненное горячими растворами.

Известно также, что, например, мощный, хоть и действовавший всего около 4 лет, гейзер Ваймангу образовался в одном из кратеров фреатических взрывов спустя 15 лет после извержения вулкана Таравера в 1886 г. (Hedenquist, 1986). В кальдере Йеллоустон 15 марта 2018 г., после почти трех лет молчания, заработал гейзер «Пароход», а 23 июня того же года в кальдере произошло землетрясение магнитудой 5,0. Таким образом, фреатические взрывы на термальных полях современных гидротермальных систем являются обычными явлениями.

Мелкие фреатические взрывы формируют небольшие воронки конической формы, которые быстро заполняются горячей водой. Как правило, такие воронки трассируют зоны повышенной трещиноватости. Нередко такие взрывы повторно происходят на дне ранее образованных крупных термальных озер. Ярким примером такого события было фреатическое извержение в озере Банном (кальдера Узон на Камчатке), причем, оно сопровождалось выбросом на поверхность мелких сферических образований самородной серы, зона расплава которой была обнаружена на глубине 26–30 м (Карпов, 1997; Karrov et al, 1998) (рис. 1).



Рисунок 1 – Озеро Банное в кальдере Узон: а) Общий вид, б) Сферические образования самородной серы на поверхности воды озера после фреатического взрыва

Иногда в зоне таких взрывов образуются пульсирующие термальные источники и гейзеры. В кальдере Узон такую природу, по-видимому, имеет гейзер Шаман, образовавшийся в 2011 г. (Карпов, 2014) (рис. 2).



Рисунок 2 – Гейзер Шаман в кальдере Узон

Как видно на рис. 2, воронка гейзера образовалась на продолжении зоны, фиксирующей разрывное нарушение субмеридианального простирания, по которому в

разное время образовалось множество чётко ориентированных воронок мелких фреатических взрывов, в настоящее время заполненных горячей водой.

Таким образом, можно считать вполне доказанным широкое развитие фреатических взрывных процессов на современных термальных полях высокотемпературных кальдерных гидротермальных систем.

Есть изотопные данные углеродсодержащих спонтанных газов гейзеров и гидротерм, указывающих на их мантийно-коровый источник (Галимов и др., 2015).

Поверхностные фреатические взрывы, по нашему мнению, свидетельствуют об активизации глубинных мантийно-коровых магматических очагов под кальдерами.

Список литературы

1. *Аверьев В.В.* Естественные термопроявления на Паужетском месторождении / В.В. Аверьев, В.М. Сугробов // Паужетские горячие воды на Камчатке М.: Наука, 1965. С. 31–43.
2. *Галимов Э.М.* Углеводороды из вулканического района. Нефтепроявления в кальдере вулкана Узон на Камчатке / Э.М. Галимов, В.С. Севастьянов, Г.А. Карпов, А.И. Камалеева, О.И. Кузнецова, И.В. Коноплева, Л.Н. Власова // Геохимия. 2015. № 12. С. 1–9.
3. *Карпов Г.А.* Современные гидротермы и ртутно-сурьмяно-мышьяковое оруденение М.: Наука, 1988, 183 с.
4. *Карпов Г.А.* Новый гейзер в Кроноцком заповеднике. Характеристика и причины возникновения // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск – Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 120–126.
5. *Карпов Г.А.* Эволюция режима и физико-химическая характеристика нового гейзера в кальдере Узон (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2012. № 3. С. 3–14.
6. *Карпов Г.А.* Расплав самородной серы на дне вулканического озера: причины образования и следствия // Доклады РАН, 1998. Т. 357. С. 95–97.
7. *Кiryukhin A.V.* Гидрогеология вулканогенов / А.В. Кирюхин, В.А. Кирюхин, Ю.Ф. Манухин СПб.: Наука, 2010. 395 с.
8. *Gordon P., Eaton P.* Magmabeneath Yellowstone National Park (New geological and geophysical data indicate the presence of a batholith, in part still molten / Gordon P., Eaton, Robert L., Christiansen, H.M., Yveratal // Science. 23 may 1975. Vol. 188, № 4190. P. 782–797.
9. *Hedenquist J.W.* Hydrothermal eruption in the Waiotapu geothermal systems, New Zealand, their origin, associated breccias and relation to precious metal mineralization / J.W. Hedenquist, R.M. Henley // Econ. Geol. 1985. Vol. 80. P. 1640–1668.
10. *Henle R.M.* Primary controls on epithermal mineralization in the Taupo volcanic zone // International Volcanological Congress. Proceedings of Symposium 5: Volcanism, Hydrothermal Systems and Related Mineralisation. 1986. P. 99.
11. *Karpov G.A.* Physicochemical Model for Native Sulphur Melt Formation at a Hot Lake Bottom / G.A. Karpov, L.A. Kazmin, V.P. Osipov // Volc. and Seism. 1998. Vol. 19. P. 797–804.
12. *Kiryukhin A.V.* A CO₂-Driven Gas Lift Mechanism in Geyser Cycling (Uzon Caldera, Kamchatka) / A.V. Kiryukhin, G.A. Karpov // Geosciences. 2020. Vol. 10. № 5, DOI: 10.3390/geosciences10050180.

Biogeochemical Processes of Mineral Formation in the Preparation of Drinking Water in the Aquifer

Valeriy V. Kulakov

*Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS, Khabarovsk, 680000 Russia
vvkulakov@mail.ru*

In the aquifer the water-rock system has been studied both in natural conditions and in the zones of biogeochemical reactors around production wells during the preparation of drinking water in situ. Oxidized iron and manganese compounds under the influence of natural groundwater with high CO₂ content and low pH values are converted into technogenic thin-crystal Mn – containing siderite. Composites are the main components that clog the screen space of production wells.

Keywords: Groundwater, Water-rock Interaction, Subsurface Iron and Manganese Removal, Clogging the Aquifer

Биогеохимические процессы формирования минералов при подготовке питьевых вод в водоносном горизонте

В.В. Кулаков

Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск, Россия

В водоносном горизонте исследована система вода-порода как в естественных условиях, так и в зонах биогеохимических реакторов вокруг эксплуатационных скважин при подготовке питьевой воды in situ. Окисленные соединения железа и марганца под воздействием природных подземных вод с высоким содержанием CO₂ и низкими значениями pH превращаются в техногенный тонкокристаллический Mn-содержащий сидерит. Композиты являются основными компонентами, колюматирующими профильтрованное пространство эксплуатационных скважин.

Ключевые слова: подземные воды, взаимодействие вода – порода, обезжелезивание и деманганация подземных вод, колюматаж

Введение

Исследования биогеохимических процессов формирования и изменения качественного состава подземных вод на Тунгусском месторождении в процессе водоподготовки питьевых вод в водоносном горизонте при исходном некондиционном их составе для водоснабжения г. Хабаровска осуществляются с 1993 года (Кулаков, 1997; Кулаков, 2004; Кулаков и др., 2008; Кулаков и др., 2012; Kulakov et al., 2011; Paufler et al., 2019). Основной водоносный горизонт месторождения приурочен к плиоцен-четвертичным аллювиальным отложениям приамурской свиты (Кулаков и др., 2012; Kulakov et al., 2011). Водовмещающими породами водоносного горизонта в междуречье Амура и Тунгуски являются кварц-полевошпатовые пески с гравием и галькой, отмечаются прослой глинистых песков и алевролитов. В песках присутствует сидерит в виде бурой кристаллической массы, развивающейся в пространстве между песчинками. Количество глинистого материала, растительных остатков и аморфного кремнезема незначительное (до первых процентов). Мощность водоносного горизонта выдержана и составляет около 60 м. С поверхности залегают покровные суглинки и глины мощностью 5-7 м. Подстиляется водоносный горизонт водоупорными глинами, аргиллитами и бурыми углями олигоценых отложений ушумунской свиты.

Качество подземных вод Тунгусского месторождения соответствует нормативным требованиям, за исключением следующих показателей: содержание общего железа

(от 12,3 до 28 мг/дм³), марганца (от 0,38 до 1,86 мг/дм³) и кремния (от 11,2 до 19,3 мг/дм³). Аномальными показателями являются: низкое значение рН находящееся в диапазоне 5,8 – 6,1, высокая концентрация растворенной двуокиси углерода (СО₂) – 220 – 250 мг/дм³.

Биогеохимические процессы при подготовке питьевых вод в пласте

Основы технологии обезжелезивания и деманганации подземных вод в пласте опираются на естественные природные окислительно – восстановительные процессы и направлены на создание искусственных активно функционирующих контактных зон вода – порода – бактериальные клетки (Кулаков и др., 2008; Кулаков и др., 2012). Техногенные биогеохимические барьеры вблизи от эксплуатационных скважин Тунгусского водозабора формируются в зоне, попадающей под влияние искусственной аэрации путем насыщения подземных вод кислородом непосредственно в водоносном горизонте. При искусственном насыщении подземных вод кислородом и удалении избыточных концентраций растворенного СО₂ на участках расположения водозаборных эксплуатационных скважин в водоносном горизонте происходит изменение состояния среды с восстановительной на окислительную. Для «зарядки» пласта в районе скважины требуется определенное время, за которое произойдет сорбция кислорода на минеральном субстрате, и в достаточном количестве размножатся специализированные группы бактерий. Осаждение железа происходит во внешней, наиболее удаленной от скважины зоне. Здесь существенно увеличивается количество железобактерий и, соответственно, возрастает число отмирающих железобактерий. Часть из них, перемещаясь потоком подземных вод при откачке в направлении фильтра скважины, поставляет органическое вещество, которое является источником органического углерода для марганецпоглощающих бактерий. Эти бактерии развиваются во внутренней зоне вблизи ствола эксплуатационной скважины и окисляют марганец, переводя его в нерастворимую форму.

Присутствие органических веществ в подземных водах является определяющим фактором развития гетеротрофных микроорганизмов различных физиологических групп, которые принимают участие в основных циклах углерода, азота и серы. От жизнедеятельности микроорганизмов зависит изменение окислительно-восстановительного потенциала, ими осуществляются процессы аммонификации, нитрификации, денитрификации, сульфатредукции. В результате трансформации органических веществ в подземных водах образуются углекислый газ, метан, сероводород и другие низкомолекулярные летучие вещества.

Железо-марганецокисляющие бактерии в естественных условиях формирования составляют незначительную долю в структуре микробного сообщества подземных вод в районе Тунгусского месторождения. Интенсификация миграции и осаждения железа и марганца в порах пласта, при участии микроорганизмов происходит лишь при создании искусственных окислительных условий при аэрации подземных вод кислородом воздуха для создания биогеохимических барьеров. В природных условиях величины рН и E_h являются недостаточно высокими для химического окисления, поэтому в окисления железа и марганца участвуют специализированные бактериальные ферментные системы. Снижение концентраций Fe и Mn при насыщении подземных вод кислородом происходит вблизи от скважин за счет процессов в биогеохимическом ректоре, формирующих биогеохимические барьеры в водоносном горизонте. В результате активизации этих процессов достижение нормативных показателей в подземной воде по содержанию железа (менее 0,1 мг/дм³) происходило через 7 дней, а марганца (менее 0,01 мг/дм³) – только через 1,5 года.

Исследование структуры микробных комплексов в эксплуатационных и наблюдательных скважинах подтвердило реальность формирования и функционирования биогеохимических барьеров (зон) на расстоянии до 15-20 м от скважин. На расстоянии 0,5 – 10 м от скважины происходит осаждение Mn при участии хемоорганотрофных бактерий, нуждающихся в органическом веществе. В наиболее удаленной от скважины зоне (8-20 м) функционируют олиготрофные литотрофные железобактерии, осуществляющие

биоаккумуляцию из воды Fe, отложение его оксидов и поставляющие органическое вещество для марганцеоксилирующих бактерий.

По результатам ПЦР-анализа установлено, что общее количество копий ДНК бактерий в подземных водах составляет 10^3 – 10^4 , а в поверхностных водах достигает 10^6 . При этом выявленное количество групп железобактерий, участвующих в технологическом цикле водоподготовки, не превышает 5–7%. По-видимому основную массу в откачиваемой воде составляют гетеротрофные бактерии, которых не смогли установить из-за отсутствия соответствующих праймеров.

Кольматаж

Для выяснения причин снижения удельных дебитов скважин на в 2015–2017 годах исследованы особенности вторичного минералообразования в породах водоносного горизонта и в прифилтровом пространстве эксплуатационных скважин Тунгусского водозабора (Кулаков и др., 2018; Кулаков и др., 2019). Комплексные исследования для изучения изменения минералогического состава водоносных песков в природной системе «вода-порода» выполнялись специалистами России и Германии на основе изучения геологического разреза по керну горных пород, извлеченного при бурении наблюдательных скважин в районе Тунгусского водозабора. Исследование минералогического состава пород и процессов вторичного минералообразования осуществлялось методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным микроанализом, рентгено-фазового анализа, рентгено-флуоресцентного анализа, ИСП-МС анализа и весового химического анализа.

Система «вода-порода» в водоносном горизонте месторождения является неравновесной, что приводит к интенсивному разрушению матричного материала песков и накоплению в них продуктов вторичного минералообразования (Кулаков и др., 2019).

Методами оптической микроскопии и рентгенофазового анализа показано, что водоносные пески в основном состоят из кварца (40-70 вес. %) и полевого шпата (анортит, альбит, ортоклаз, 20-50 вес.%), к которым в количестве первых процентов примешиваются халцедон, слюды и глинистые минералы.

Содержание сидерита в песках в основном варьирует от 0 до 14,35 вес. %, в целом увеличиваясь с глубиной. Сидерит кристаллизуется в поровом пространстве песков, иногда практически полностью закупоривая его бурой кристаллической массой с образованием конкреций.

В большинстве образцов водоносных песков присутствует аморфный кремнезем в виде тонкозернистых хлопьевидных агрегатов. Его содержание колеблется в пределах 5-15 вес.% и не зависит от близости точки опробования к эксплуатационной скважине.

Глинистый материал частично является первично осадочным, а частично – вторичным, образованным после разрушения и переотложения полевых шпатов. Коррозия полевых шпатов идет преимущественно по направлениям спайности. При этом образуются микрочешуйки размером от единиц до десятков микрометров уплощенной и неправильной формы. Так же происходит разрушение авгита.

Видимого разрушения кварцевых песчинок не отмечено, возможно, из-за равномерной коррозии поверхности кварца, не имеющего спайности. Этот процесс, а также высвобождение кремнезема в процессе разрушения полевых шпатов и других минералов песков (пироксены, амфиболы, слюды), обеспечивает высокое содержание растворенного кремнезема в подземных водах и наличие в составе тонкой фракции аморфного кремнезема.

По результатам оптических исследований в водоносных песках месторождения присутствуют две разновидности сидерита (Кулаков и др., 2019). Первая образует достаточно крупные (до первых мм) бурые кристаллы, цементирующие песчаный материал с образованием линз и прослоев песков с пониженной пористостью. Вторая скрытокристаллическая, входит в состав тонкой фракции в виде пылевидного материала.

Композитов с таким алюмосиликатным цементом не встречено ни в одной пробе из водоносных песков (Кулаков и др., 2019). Во всех случаях обнаружения в них

сцементированных песков роль цемента выполнял сидерит. Композиты, состоящие из окатанных матричных песчинок и микрообломков полевых шпатов, пироксенов и кварца, сцементированных тонкозернистым алюмосиликатным материалом, являются основным компонентом, кольматирующим прищелевое пространство фильтров скважин.

Заключение

В водоносном горизонте Тунгусского месторождения подземных вод идут естественные процессы разрушения матричных минералов песков – полевых шпатов, пироксенов, сидерита, в меньшей мере – кварца.

В зонах биогеохимических реакторов при насыщении подземных вод кислородом возле эксплуатационных скважин к этим продуктам добавляются окисленные формы железа и марганца, которые аккумулируются в техногенном сидерите. Кроме того, при биогеохимическом процессе вместе с твердыми продуктами разрушения и глинистыми минералами образуется специфический нерастворимый в кислотах композит.

Список литературы

1. Кулаков В.В. Процессы изменения качества подземных вод на участках работы установок обезжелезивания и деманганации в водоносном пласте // Проблемы изучения химического состава подземных вод: 6-е Толстихинские чтения. СПб., 1997. С. 95–102.
2. Кулаков В.В. 100 лет технологии очистки подземных вод от железа в водоносном горизонте (in-situ). Мат. 6-го междунар. конгресса ЭКВАТЭК-2004 «Вода: экология и технология», г. Москва, 1 – 4.06.2004, Часть 1. М., 2004. С. 173–174.
3. Кулаков В.В. Изменение минералогического состава водоносного горизонта при внутрипластовой подготовке питьевых вод / В.В. Кулаков, Н.В. Бердников // Подземные воды Востока России: мат. Всеросс. Совещ. по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием, г. Новосибирск, 18-22 июня 2018 г.). Новосибирск, 2018. С. 276–280.
4. Кулаков В.В. Природные и техногенные процессы минералообразования в водоносном горизонте Амуро-Тунгусского междуречья / В.В. Кулаков, Н.В. Бердников, В.О. Крутикова и др. // Тихоокеанская геология. 2019. Т.38, № 2. С. 63–72.
5. Кулаков В.В. Биогеохимические аспекты очистки подземных вод Приамурья / В.В. Кулаков, Л.М. Кондратьева // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 1. С. 109–118.
6. Кулаков В.В. Формирование биогеохимических барьеров при подготовке питьевых подземных вод в водоносном горизонте / В.В. Кулаков, Л.М. Кондратьева, Й. Херлitzius и др. // Подземная гидросфера: Мат. Всеросс. совещ. по подземным водам Востока России (Иркутск, 2012). С. 209–213.
7. Kulakov, V.V. Riverbank filtration as an alternative to surface water extraction for safe drinking water supply to the city of Khabarovsk, Russia / V.V. Kulakov, N.K. Fisher, L.M. Kondratieva et al.; Ray, C., Shamruk, M. (Eds.) // Riverbank Filtration for Water Security in Desert Countries. Springer, Dordrecht. 2011. P. 281–298.
8. Paufler S. Manganese release linked to carbonate dissolution during the start-up phase of a subsurface iron removal well in Khabarovsk, Russia / S. Paufler, T. Grischek, J. Herlitzius et al. // The Science of the Total Environment. 2019. Т. 650. P. 1722–1733.

Научное издание

**Proceedings of All-Russian Scientific Conference with International Participation
«Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil&Gas Geology»
(Geothermal Volcanology Workshop 2020),
03 – 08 September, 2020**

**Материалы всероссийской научной конференции с международным участием
«Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа»
(Geothermal Volcanology Workshop 2020)
3 – 8 сентября 2020 г.**

Подписано к печати 27.10.2020

Формат 60x84/8

Бумага типографская

Усл.-печ. л. 20.93

Тираж 25 экз.

Заказ № 30306

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в ИВиС ДВО РАН,
в ООО «ФОН», 683024, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Владивостокская д. 37