

Том II



Национальный  
исследовательский  
Томский  
государственный  
университет



# Динамика и взаимодействие геосфер земли

Том II

МАТЕРИАЛЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

Динамика и взаимодействие геосфер земли



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»



Национальный  
исследовательский  
**Томский  
государственный  
университет**



**Геолого-  
географический  
факультет**

Томского  
государственного  
университета

# **ДИНАМИКА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГЕОСФЕР ЗЕМЛИ**

Материалы Всероссийской конференции с международным участием,  
посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете  
специалистов в области наук о Земле

8–12 ноября 2021 года

**ТОМ II**

Томск 2021

УДК 551.5; 556  
ББК Д26

**Динамика и взаимодействие геосфер Земли.** Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 100-летию подготовки в Томском государственном университете специалистов в области наук о Земле. В 3-х томах. Том II. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ. 2021. – 216 с.

**ISBN 978-5-89702-481-0**

Во втором томе сборника представлены материалы двух секций: «Динамика и взаимодействие гидро- и криосферы» и «Состояние атмосферы и климатические ресурсы».

Для специалистов в области гидрологии, гляциологии, метеорологии и климатологии.

**Редакционная коллегия:** Эрнст Р.Э., Орлов В.П., Добрецов Н.Л., Коротеев В.А., Ревердатто В.В., Пеков И.В., Соломина О.Н., Врублевский В.В., Дюкарев А.Г., Изох А.Э., Кирпотин С.Н., Переведенцев Ю.П., Подобина В.М., Семенов С.М., Хорошев А.В.

**Ответственные редакторы II тома:**

Д.А. Вершинин, А.А. Ерофеев, В.А. Земцов, О.В. Носырева

**Технический редактор** – Е.М. Асочакова

**Фото на обложке:** Е. Марковой

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ «ДИНАМИКА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГИДРО- И КРИОСФЕРЫ»

<b>Болгов М.В.</b> ФОРМИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПАВОДКОВ И ПОЛОВОДИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РФ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ .....	8
<b>Агафонова С.А., Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Ефимов В.А., Э Василенко А.Н., Сазонов А.А., Ефимова Л.Е.</b> ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В УСТЬЕ КОЛЫМЫ ЛЕТОМ 2019 ГОДА .....	11
<b>Баншев Н.Е.</b> ДИНАМИКА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ НАЛЕДЕЙ НА УЧАСТКЕ ИЕНГРА-ЧУЛЬМАН (ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ) ФЕДЕРАЛЬНОЙ АВТОДОРОГИ А-360 «ЛЕНА».....	14
<b>Бондарев С.А., Кидяева В.М.</b> КАТАЛОГ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР БОЛЬШОГО КАВКАЗА .....	17
<b>Бородавко П.С., Демберел О.</b> ВНУТРИСТРУКТУРНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ БОЛЬШОГО АЛТАЯ .....	18
<b>Бузмаков С.В., Зорина А.А., Юхно А.В., Кулешов А.А.</b> ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА СКОРОСТИ ВОДНОГО ПОТОКА В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ .....	21
<b>Вершинин Д.А., Земцов В.А., Тарасов А.С.</b> МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СРОКОВ ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ И ВСКРЫТИЯ НА Р. ТОМИ У Г. ТОМСКА – РЕЗУЛЬТАТЫ С УЧЕТОМ ИСТОРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В XVIII И XIX СТОЛЕТИЯХ .....	25
<b>Викулина М.А., Турчанинова А.С.</b> ВЛИЯНИЕ СНЕЖНЫХ ЛАВИН НА РЕКРЕАЦИОННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХИБИН .....	28
<b>Горошкова Н.И., Семенова Д.А., Стриженок А.В.</b> ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ВЕРХНЕЙ ЛЕНЫ .....	31
<b>Отгонбаяр Д., Батсүрэн Б., Билгүүн Ц., Баярмаа М., Золбаяр Ж.</b> ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ЭВОЛЮЦИЯ ГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ ГОРНОГО УЗЛА ЦАМБАГАРАВ (МОНГОЛЬСКИЙ АЛТАЙ) .....	34
<b>Епифанов В.А.</b> БЛОУАУТИНГ-ГИДРОВУЛКАНИЗМ КАК ЯВЛЕНИЕ ФИНАЛЬНОЙ ФАЗЫ ДЕГРАДАЦИИ ПАЛЕОКРИОСФЕРЫ («ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ») В ВАСЮГАНСКИХ И ПИНСКИХ БОЛОТАХ .....	38
<b>Замараева Я.А., Вершинин Д.А.</b> МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ РАСХОДОВ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ И РАСХОДОВ ВОДЫ В ВЕРХНЕМ ТЕЧЕНИИ БАССЕЙНА Р. ОБЬ .....	44
<b>Кашдан А.И., Ерофеев А.А.</b> МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЛАВИННОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКОГО $\alpha$ - $\beta$ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАЛЬНОСТИ ВЫБРОСА ЛАВИН .....	48
<b>Копысов С.Г.</b> ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СИБИРИ.....	49
<b>Копысов С.Г., Федосин К.Д.</b> РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ВОДНОГО БАЛАНСА КРАСИЛОВСКОГО ОЗЕРА НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА .....	52
<b>Литвиненко В.В., Шакиров Р.Р.</b> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ РЕК (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ВЕРЕЖКА ЮХНОВКОГО РАЙОНА КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ) .....	55

<b>Магрицкий Д.В.</b> ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕПЛООВОГО СТОКА РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ И ОЦЕНКА ЕГО ВЕЛИЧИНЫ.....	57
<b>Магрицкий Д.В., Банщикова Л.С.</b> РЕАКЦИЯ СТОКА НАНОСОВ РЕК В БАСЕЙНЕ Р. ЛЕНЫ НА ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ХОЗЯЙСТВЕННУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ .....	61
<b>Никитин К.В.</b> ПОЛЕ АККУМУЛЯЦИИ ЛЕДНИКА ЛЕВЫЙ АКТРУ .....	65
<b>Путырский В.Е.</b> ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЕТРА, ТЕЧЕНИЙ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ .....	66
<b>Разумов С.О.</b> ОЦЕНКА РЕАКЦИИ ЛЬДИСТЫХ БЕРЕГОВ ВОСТОЧНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ ХХІ В. ....	67
<b>Савичев О.Г., Пасечник Е.Ю., Адыкса И.П.</b> МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЙ ТИТАНА В ВОДАХ РЕКИ ОМУТНАЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ) .....	71
<b>Тарбеева А.М., Ефремов В.С., Лебедева Л.С., Шамов В.В., Куть А.А., Тихонравова Я.В.</b> ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕРМОЭРОЗОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА СЕВЕРЕ ЯКУТИИ .....	74
<b>Тумской В.Е.</b> ЛЕДОВЫЙ КОМПЛЕКС – К ВОПРОСУ ОБ УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОИСХОЖДЕНИИ .....	78
<b>Фролов Д.М., Кошурников А.В., Гагарин В.Е., Додобоев Э.И.</b> НАБЛЮДЕНИЯ И РАСЧЁТЫ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА НА ПЕРЕВАЛЕ АНЗОБ (ТАДЖИКИСТАН) .....	81
<b>Фролов Д.М., Кошурников А.В., Гагарин В.Е., Ржаницын Г.А.</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УПЛОТНЁННОГО СНЕГА .....	84
<b>Ченсизбаев Д.Б., Аденова Д.К., Кан С.М.</b> ФАКТОРЫ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ШУ-САРЫСУЙСКОЙ ПРОВИНЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН .....	86
<b>Чеховских А.М., Поповнин В.В.</b> УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛЯ АККУМУЛЯЦИИ И ПОЛЯ АБЛЯЦИИ ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ .....	89
<b>Чувичкин Д.С., Ерофеев А.А.</b> СВЯЗЬ ДЕГРАДАЦИИ ЛЕДНИКА ВОДОПАДНЫЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ГОРНО-ЛЕДНИКОВОМ БАСЕЙНЕ АКТРУ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 80 ЛЕТ .....	90

## **СЕКЦИЯ «СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ»**

<b>Абдукодиров И.И., Носырева О.В., Барашкова Н.К., Кижнер Л.И.</b> МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И СТРУКТУРА ОТОПИТЕЛЬНОГО СЕЗОНА В ТОМСКЕ .....	94
<b>Адаменко М.М.</b> ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ГОРАХ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ В 2011–2021 ГОДАХ.....	97
<b>Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В.</b> СОСТАВ ВОЗДУХА НАД МОРСКИМИ АКВАТОРИЯМИ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ .....	101
<b>Апостолиди Х.Т., Гришаев М.В.</b> ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМА ВЕТРА НА ТЕРРИТОРИИ БОЛЬШОГО ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ В ПЕРИОД ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА .....	104
<b>Ветров А.Л., Тиунов А.А.</b> ОБЪЕДИНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ И РЕЧНЫХ ВОДОСБОРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПАВОДКОВ .....	106

<b>Волобуева О.В., Топтунова О.Н.</b> ЯВЛЕНИЯ ПОГОДЫ, УХУДШАЮЩИЕ ВИДИМОСТЬ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН .....	109
<b>Горбатенко В.П.</b> ТЕНДЕНЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ .....	113
<b>Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н.</b> ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ МЕЖДУРЕЧЬЯ ОБЬ-ИРТЫШ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА .....	117
<b>Гречушникова М.Г., Ломова Д.В., Ломов В.А.</b> УДЕЛЬНЫЙ ПОТОК МЕТАНА С ПОВЕРХНОСТИ РАЗНОТИПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ.....	120
<b>Громова А.В., Горбатенко В.П., Нагорский П.М., Пустовалов К.Н.</b> ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ СЕТИ WWLLN.....	122
<b>Гусак Д.В.</b> ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО РАЗВИТИЮ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	125
<b>Долгова Н.В., Волкова М.А.</b> СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ ЮЖНОЙ СИБИРИ И СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА .....	128
<b>Жуков Д.Ф., Пустовалов К.Н., Кошикова Т.С., Нагорский П.М., Оглезнева М.В.</b> СТРУКТУРА ВЕРШИН МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ НАД ЮГОМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА CALIPSO.....	131
<b>Камалова Р.Г., Белан Л.Н., Богдан Е.А.</b> КЛИМАТ ГЕОПАРКА ЮНЕСКО «ЯНГАН-ТАУ» И ЕГО СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ .....	134
<b>Камалова Р.Г., Исмагилова А.И.</b> СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН И ЕГО СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ .....	137
<b>Картавых М.С., Пустовалов К.Н., Кошикова Т.С., Нагорский П.М., Оглезнева М.В.</b> ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ НАД ЮГОМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА CLOUDSAT .....	140
<b>Кашлева Л.В., Мацуцина Ю.С., Михайловский Ю.П., Зайнетдинов Б.Г.</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕВОЗМУЩЕННОЙ АТМОСФЕРЫ.....	143
<b>Кочугова Е.А., Шутова А.Е.</b> СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ .....	145
<b>Кошкина А.С., Топтунова О.Н., Анискина О.Г., Волобуева О.В., Дробжева Я.В.</b> ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В РЕЖИМАХ ТЕМПЕРАТУРЫ, ОСАДКОВ И СНЕЖНОГО ПОКРОВА В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СИБИРИ КАК ОТКЛИК ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ.....	149
<b>Кужевская И.В.</b> КЛИМАТ И ЗДОРОВЬЕ .....	152
<b>Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.</b> ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НИЖНЕЙ СЛОИСТООБРАЗНОЙ ОБЛАЧНОСТИ И ЕЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ СИБИРСКОГО РЕГИОНА.....	154
<b>Максютова Е.В., Башалханова Л.Б.</b> ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА УСЛОВИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ .....	158
<b>Матюхина А.А., Воропай Н.Н., Мартынова Ю.В.</b> МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАТ ОБРАЗОВАНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ ПО РАЗНЫМ НАБОРАМ ДАННЫХ .....	160
<b>Мезенцева О.В., Кусаинова А.А.</b> ОЦЕНКА ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ В УСЛОВИЯХ АРИДНОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА.....	162

<b>Моктар М.</b> РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ОСАДКОВ В МАВРИТАНИИ .....	165
<b>Морозова С.В., Полянская Е.А., Алимпиева М.А.</b> ИЗМЕНЧИВОСТЬ СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КАК ИНДИКАТОР ФЛУКТУАЦИЙ КЛИМАТА .....	167
<b>Морозова С.В., Полянская Е.А., Алимпиева М.А.</b> О РОЛИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В НАСТОЯЩИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ .....	171
<b>Нечепуренко О.Е., Пустовалов К.Н., Горбатенко В.П.</b> ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ БОЛЬШОГО ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ERA5 .....	175
<b>Оглезнева М.В., Нагорский П.М., Пустовалов К.Н., Сат А.А.</b> ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ МЕСТНОСТИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БУРЯТИЯ .....	178
<b>Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М.</b> ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ 1976-2019 гг. ....	180
<b>Пустовалов К.Н., Нагорский П.М., Оглазнева М.В., Сат А.А.</b> СУТОЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФОНОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БУРЯТИЯ .....	183
<b>Репина И.А., Степаненко В.М., Барсков К.В., Пашкин А.Д., Артамонов А.Ю.</b> ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ С НЕОДНОРОДНОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ .....	187
<b>Рыскаль М.О., Рыскаль Д.В.</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ГОДОВЫХ СУММ ОСАДКОВ ПО ТЕРРИТОРИИ КЫРГЫЗСТАНА .....	190
<b>Севастьянов В.В.</b> ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КЛИМАТО-РЕКРЕАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ В КУЗНЕЦКО-САЛАЙРСКОЙ ОБЛАСТИ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД .....	195
<b>Складнева Т.К., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Фофонов А.В.</b> РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ .....	199
<b>Филатов Д.Е.</b> ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТЕЛЕЙ .....	202
<b>Чередыко Н.Н., Волков Ю.В., Тартаковский В.А., Крутиков В.А.</b> РЕГИОНАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ КЛАСТЕРЫ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ НА ФОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА .....	204
<b>Чередыко Н.Н., Волкова М.А., Scholtz O.</b> КОЛЕБАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ .....	205
<b>Чередыко Н.Н., Малышков С.Ю., Гордеев В.Ф., Тартаковский В.А.</b> АНАЛИЗ СОГЛАСОВАННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ШУМАМИ ЗЕМЛИ .....	207
<b>Чурсин В.В., Кужевская И.В.</b> ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГРОЗ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ .....	208
<b>Шкляев В.А.</b> ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРОФИЛЕМЕРА .....	211
<b>Шуклина Е.С., Воропай Н.Н., Черкашина А.А.</b> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БАЗЫ ДАННЫХ ПО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ПОЧВ И ГРУНТОВ GSDE (GLOBAL SOIL DATASET FOR EARTH SYSTEM MODELS) С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ .....	215

**СЕКЦИЯ**

**«ДИНАМИКА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
ГИДРО- И КРИОСФЕРЫ»**

## ФОРМИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПАВОДКОВ И ПОЛОВОДИЙ НА ТЕРРИТОРИИ РФ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

М.В. Болгов

*Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия, bolgovmv@mail.ru*

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2019-0003 государственного задания ИВП РАН (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090105-5).

В последние десятилетия в мировом сообществе и в России активно обсуждается проблема наводнений. Это связано с растущим в мире масштабом потерь и ущербов от наводнений, составляющих существенную долю неблагоприятных последствий природных катаклизмов. Весьма велика угроза наводнений и в России, где площадь паводкоопасных территорий составляет 400 тыс. км<sup>2</sup>, из которых 50 тыс. км<sup>2</sup> ежегодно подвергается затоплению. Особенно большой ущерб возникает при прохождении экстремально высоких и достаточно редких половодий и паводков. К числу относительно новых проблем можно отнести увеличение рисков затопления по причине климатических изменений.

Проблема наводнений заключается: а) в отсутствии актуальных представлений о формировании ущербов при прохождении этих опасных явлений, что затрудняет принятие стратегических решений в этой области, б) в явной недостаточности средств и методов прогнозирования (как вероятностного долгосрочного, так и оперативного), а также систем мониторинга, в) в недостаточности нормативно-правовой базы, регулирующей деятельность в области снижения рисков от опасных гидрологических явлений.

Под наводнением понимается резкое повышение уровня воды в реке, водоеме, водохранилище, море (или его части), приводящее к затоплению значительных участков суши и наносящее материальный ущерб. Под ущербом могут пониматься как разрушение зданий и сооружений и человеческие жертвы, так и изменения (потеря) экосистем (водных и наземных пойменных) и разрушение форм рельефа.

Наводнения вызываются различными причинами. Для большей части территории России характерно весеннее половодье, вызванное таянием снежного покрова, накопившегося за зимний период. При благоприятных обстоятельствах в речную сеть поступает большое количество воды, превышающее пропускную способность русел. В результате вода затопливает низко расположенные участки долины реки, образуя наводнения. На реках, текущих с юга на север, весенние половодья часто сопровождаются заторами льда, которые усугубляют размеры бедствия, поскольку резко снижают пропускную способность русла. К числу таких наводнений относится не столь давнее затопление г. Ленска на р. Лене.

Большую опасность представляют собой наводнения на побережьях морей и в устьях рек, вызываемые различными причинами. На побережьях замкнутых (внутренних) морей и озер опасны колебания уровня в результате накопления воды в водоеме в силу группирования многоводных лет в рядах речного притока. Так на Каспийском море за 100-летний период наблюдений амплитуда таких колебаний составила более трех метров. Отдельной проблемой являются наводнения техногенного характера. Наиболее тяжелые последствия могут иметь разрушения плотин, сопровождающиеся распространением по долине реки прорывной волны, высота которой может достигать десятков метров.

Современная гидрологическая и водохозяйственная практика имеет дело с различными аспектами проблемы наводнений. Учет опасности наводнений в практике проектирования и оперативного управления осуществляется путем оценки нагрузок, вызываемых этими явлениями. В большинстве случаев прямая оценка негативного воздействия паводочных вод на сооружение весьма сложна. В качестве показателя опасности используется уровень воды заданной вероятности превышения. Вероятность превышения расчетного паводка назначается строительными нормами в зависимости от класса капитальности (или уровня ответственности) сооружения. Такая схема задания нагрузок при решении задач надежности, в проектировании называется «полувероятностным» подходом.

В оперативном управлении опасность гидрологического явления оценивается с помощью разнообразных методов прогнозирования и основной характеристикой гидрологического прогноза, определяющей возможность реализации защитных и эвакуационных мероприятий, является его заблаговременность.

Переходя, к, собственно, проблеме наводнений, отметим, что возникновение рисков от наводнений, как и других негативных (опасных) явлений является следствием существенной изменчивости и слабой предсказуемости развития опасных гидрометеорологических процессов, на которые накладываются последствия плохо организованной хозяйственной деятельности. Полностью устранить угрозу наводнений нельзя в силу природных особенностей функционирования гидроклиматической системы и вероятностного характера опасных гидрологических событий, но организация

и проведение предупредительных, защитных и эвакуационных мероприятия, существенно снижающих риски потерь для экономики страны и населения – вполне реализуемая задача.

Исходя из практического опыта, а также анализа существующей научно-методической базы, можно сформулировать основные причины возникновения значительных негативных последствий при наводнениях:

1. Недостаточный учет аномального характера гидрометеорологических явлений, в том числе и по причине антропогенных воздействий на водосбор и русло реки, климатических изменений. В долгосрочной и среднесрочной перспективе имеется большая неопределенность прогноза климатических изменений.

2. Ошибки инженерно-геологических и гидрологических изысканий, инженерных расчетов и проектирования по причине недостаточности средств, данных гидрологического и метеорологического мониторинга, требуемой квалификации специалистов для интерпретации результатов мониторинга и прогнозных расчетов.

3. Плохое качество строительных работ при возведении зданий, инженерных сооружений, а также при создании систем инженерной защиты. Отсутствие (недостаточность) необходимых ремонтных работ.

4. Несанкционированные (или нерегламентированные) режимы оперативного управления при эксплуатации гидротехнических сооружений.

5. Нарушение условий землепользования в нижних бьефах, в том числе несанкционированная застройка вдоль побережья.

6. Недостаточная информированность населения о возможных последствиях опасного воздействия вод в целом и при прохождении конкретного паводка в частности.

7. Нехватка сил и средств гражданской обороны.

Рассмотрим далее два примера опасных и катастрофических случаев наводнений на территории РФ и соответствующие методические задачи.

Катастрофичность ситуации 2007 г. на Зейском водохранилище. Паводок 2007 года на р. Зея имел объем стока примерно  $15 \text{ км}^3$  (приток к водохранилищу), что меньше емкости форсировки на  $5 \text{ км}^3$ . По максимальному пиковому расходу обеспеченность паводка составила примерно 1%, т.е. такая величина может быть превышена в среднем один раз в сто лет. Паводки такой обеспеченности являются «расчетными» для большинства классов гидротехнических сооружений, но, тем не менее, их прохождение является испытанием для конструкций и персонала. Для водохранилищ крупных ГЭС расчетным является случай 1 раз в 1000 лет, что говорит о запасе надежности при пропуске паводка. Однако для нижнего бьефа ситуация носит иной характер. «Срезка» паводочных расходов водохранилищем в течение десятилетий подряд приводит к тому, что закон распределения максимальных расходов в нижнем бьефе приобретает сильно асимметричные очертания при существенно меньших значениях (по сравнению с естественным режимом). Но надо иметь в виду, что как правило, катастрофические паводки пропускаются через гидроузлы с меньшей степенью

трансформации, и стихийно возведенные в зоне потенциального затопления объекты испытывают в этих редких случаях значительные негативные последствия (ущербы).

Основной причиной возникновения катастрофической ситуации на Зейском водохранилище является неконтролируемая застройка затопляемых территорий в нижнем бьефе. Эта проблема носит сложный характер и до конца не урегулирована в правовом поле. Законодательство (Градостроительный и водный кодексы, Строительные нормы и правила) не запрещают в явном виде строительства в зонах периодического затопления. Только СНиП 2.07.01-89\* (2000), п. 9.3\*(Примечания) не допускает размещение зданий и сооружений в зонах возможного катастрофического затопления в результате разрушения плотин или дамб. Во всех остальных случаях, согласно Градостроительному Кодексу, требуется лишь зонирование территории с выделением участков, подверженных воздействию опасных процессов. Таковыми на застраиваемой территории являются участки, затопляемые один раз в сто лет (согласно п.8.6 того же СНИПа). Федеральные строительные нормативы не регламентируют детально правила хозяйствования на застраиваемых территориях, относя этот вопрос к ведению Субъектов Федерации. Так Постановление правительства №242 от 20.03.94 обязало Субъекты Федерации установить границы периодического затопления территорий и утвердить Положения об условиях хозяйственной деятельности на них. Для Амурской области такое «Положение...» разработано не было.

Среди наиболее опасных событий последних лет можно отметить также наводнение в г. Крымске в 2012 году, дождевые паводки в Приморье в последние годы, и выдающийся паводок 2019 года на р. Ия в июне 2019 г. В качестве второго примера рассмотрим методические подходы и результаты оценки характеристик максимального стока р.Ия с учетом экстремального дождевого паводка 2019 года, приведшего к катастрофическому наводнению в г. Тулун Иркутской области.

Наводнение 2019 года развивалось по катастрофическому сценарию со значительными ущербами и человеческими жертвами. Система инженерной защиты города от наводнений не справилась со своими функциями по причине экстремального характера явления: наблюдавшиеся уровни воды существенно превысили расчетные значения для данного класса сооружений. Уровни воды превысили проектные величины в том числе и по причине дополнительного влияния гидротехнических сооружений (мостовых переходов, дамб) и сужений русла.

Одна из основных гидрологических задач состоит в определении максимального расхода дождевого паводка, поскольку в результате наблюдений были зафиксированы только уровни воды на гидрологическом посту и собраны метки высоких вод в результате обследования затопленной территории. Для оценки расходных характеристик экстремального паводка и выявления факторов и причин затопления территории, разрабо-

тана гидродинамическая модель движения воды в р. Ия на участке в районе г. Тулун, позволяющая рассчитывать кривые свободной поверхности, необходимые также при проектировании системы инженерной защиты. Результаты расчетов уровней затопления с обеспеченностью 1% позволили установить и расход воды, при котором наблюдалось хорошее соответствие рассчитанных отметок водной поверхности и собранных в процессе изысканий положений максимальных уровней. Этот расход составил величину 6700 м<sup>3</sup>/сек.

Временной ряд максимальных расходов воды дождевых паводков р. Ия – г. Тулун характеризуется наличием выдающегося значения, наблюдавшегося в 2019 году, поэтому следующей задачей гидрологического расчета является выполнение статистической обработки данных наблюдений с учетом экстремального события.

В гидрологии известен подход, предложенный Г.А. Алексеевым, основанный на использовании нескольких экстремальных значений в году для получения более надежных оценок параметров распределения максимального стока или осадков. При этом вместо полной совокупности данных рассматриваются величины, превышающие некоторый назначаемый порог, что является аналогом усечения исходной совокупности, выполняемого с целью исключения из анализируемых данных сведений о низких максимальных расходах, не являющихся информативными для параметров модели, предлагаемой для зоны малых обеспеченностей.

При применении метода допускается, что рассматриваемые пиковые значения в случайной стационарной последовательности событий выше некоторого порога независимы и их число при определенных условиях подчиняется закону Пуассона. По данным наблюдений за максимальными расходами воды р. Ия – г. Тулун за 1936–2018 гг., а также по восстановленным расходам за 2019 г., определены квантили заданной вероятности превышения для выборок, состоящих из трех и двух максимумов в каждом году. Для получения оценок выбраны пороговые значения, «усекающие» ряд в точках 25% и 50%. По результатам расчетов можно сделать вывод, что чем больше степень усечения, тем ближе теоретическая кривая к эмпирическим данным, но и погрешность таких оценок больше. Выполненные расчеты дали расчетное значение максимального суточного расхода 1% обеспеченности, равное 4920 м<sup>3</sup>/сек.

Важнейшая проблема гидрологического расчета связана с необходимостью учета нарушения однородности рядов максимального стока. Собственно, проблема заключается в том, что далеко не всегда в данных гидрометеорологических наблюдений (во временных рядах) мы можем выделить и обосновать наличие долгопериодных колебаний (например, затяжные маловодья) и трендов, обусловленных именно климатическими изменениями. Эти выводы относятся к разным видам стока, процесс формирования которого в условиях климатических изменений, определяется также множеством параметров, а реакция стока на происходящие изменения может иметь “пороговый” характер.

В ряде работ автором была сформулирована гипотеза, согласно которой неоднородный гидрологический ряд может рассматриваться как смена стационарных состояний (периодов), в пределах которых сохраняются свойства стационарного процесса, такие, как например, марковость. Для максимального стока внутрирядной связностью можно пренебречь, поэтому решение задачи прогноза можно получать в виде одномерного распределения стока, применяя для расчета формулу полной вероятности.

Визуальный анализ графика и результаты вычисления критериев однородности позволили сделать заключение о неоднородности ряда максимальных расходов воды р.Ия – г. Тулун относительно дисперсии. В результате ряд был разбит на две части, и расчетная кривая была получена как результат построения комбинированного распределения вероятностей.

Результаты выполненных исследований и изысканий показали, что причиной затопления значительной части застроенной территории г. Тулун в 2019 году явился сформированный сильными осадками дождевой паводок, вероятность которого оценивается примерно в 0,3%, или один раз в 250–300 лет. Вероятность дождевого паводка 2019 года существенно меньше расчетной, которая для затопляемой городской территории составляет 1% (один раз в 100 лет). В результате сформировалось наводнение с глубинами затопления застроенной территории до нескольких метров.

Неблагоприятное расположение части территории г. Тулун в зоне затопления дождевыми паводками в сочетании со сложным характером распространения паводочной волны, приводит к значительным рискам возникновения ущерба населению и экономике города. С учетом того, что прогноз климатических изменений и вызываемых ими наводнений осуществляется сегодня с большой ошибкой, расчетные значения расходов необходимо определять по совокупности методов, вводя тем самым некоторый запас.

По результатам рассмотрения проблемы наводнений можно сделать следующие выводы:

Защита от наводнений не может быть абсолютной; достижим лишь некоторый уровень безопасности. Причины: практически неограниченный диапазон высоты половодья (при уменьшении вероятности события  $P$  % максимальный расход воды  $Q_{\text{макс}}$  теоретически стремится к бесконечности) и рост стоимости защитных мероприятий по мере повышения уровня надежности противопаводковой защиты.

Представляется абсолютно необходимым государственное планирование и проведение неотложных мероприятий по предотвращению или смягчению ущерба от наводнений, включая создание и совершенствование в паводкоопасных зонах современной системы штормового оповещения, разработка как технических регламентов, так и территориальных строительных норм, обобщающих данные гидрометеорологических наблюдений последних лет и дающих более надежные оценки опасности наводнений.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В УСТЬЕ КОЛЫМЫ ЛЕТОМ 2019 ГОДА

С.А. Агафонова, Д.В. Магрицкий, Н.Л. Фролова, В.А. Ефимов,  
А.Н. Василенко, А.А. Сазонов, Л.Е. Ефимова

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, sv\_ice@list.ru*

Исследование выполнено при финансовой поддержке проектов РФФИ №18-05-60021 и 18-05-60219.

В работе представлены результаты гидрологического обследования устья р. Колымы. Серия измерений позволили выяснить характер вдольруслового нарастания стока воды, вклад в него главных притоков и распределение стока в дельте. Получены данные о распределении взвесей в потоке и их составе. В пределах устьевого участка выделены 2 зоны смешения: на придельтовом отрезке (вод главной реки и ее правобережных притоков), а также в дельте и на устьевом взморье (зона смешения речных и морских вод).

*Ключевые слова:* Колыма, экспедиционные исследования, дельта, гидрологический режим

The paper presents the results of hydrological fieldwork in the mouth of the Kolyma River. A series of measurements allowed us to find out the nature of the long-term increase in water runoff, the contribution of the main tributaries to it, and the distribution of runoff in the delta. Data on the distribution of suspensions in the flow and their composition are obtained. There are 2 mixing zones within the estuarine section: on the near-delta segment (the waters of the main river and its right-bank tributaries), as well as in the delta and on the seashore (the zone of mixing of river and sea waters).

*Keywords:* the Kolyma River, expedition research, river delta, hydrological regime

Река Колыма впадает в Колымский залив Восточно-Сибирского моря. Это шестая по размеру водосбора река России. Тем не менее, устье р. Колымы – одно из наименее изученных среди больших рек российской Арктики, несмотря на сохранившуюся здесь хозяйственную деятельность.

Устьевой участок р. Колымы имеет длину 282 км и включает придельтовый широкопойменный отрезок и многорукавную неприливную дельту выполнения (рис. 1). Вершина устьевой области совпадает с устьем Омолона, куда могут распространяться нагоны обеспеченностью менее 10%. Помимо Омолона в Колыму на устьевом участке впадает второй (после Омолона и также справа) по водоносности приток – река Анюй (на 153 км). В вершине дельты (у пос. Черский) река делится на 2 рукава: Каменную Колыму и Черноусовскую протоку, которая, сливаясь с Мархаяновской протокой, образует Походскую Колыму. Правый берег Каменной Колымы высокий (до 30–40 м) с каменными отвесными мысами. Левобережье дельты, наоборот, равнинное, заболоченное, с многочисленными старицами, тундровыми речками и термокарстовыми озерами. В устьях дельтовых рукавов имеются обширные бары, выдвинутые на 4–6 км за линию морского края дельты.

Экспедиционные гидрологические измерения в устье Колымы проводились в 1928–1929, 1934–1937 гг. (ГУСМП), 1953–1954 гг. (Арктикпроектом) и в 1991 г. (АНИИ). Стационарные измерения уровней воды на устьевом участке осуществлялись на постах Колымское (282 км от моря), Нижнеколымск (в 155 км) и Чер-

ский (в 120 км), а расходов воды – лишь на гидропосте Колымское-I (в 272 км от моря). Сохранившаяся в настоящее время сеть постов не позволяет в достаточной мере охарактеризовать современный гидрологический режим устьевой области и его трансформацию из-за региональных гидроклиматических изменений, эксплуатации недавно созданных Колымского и Усть-Среднеканского водохранилищ, сокращения объемов дноуглубления в русле и на устьевом баре, закрытия золотодобывающих предприятий. Мало того, в 1988 г. урвенный пост в пгт. Нижнеколымск был закрыт, в 1998 г. прекращены измерения расходов воды на Колымском-I.

Новые и важные знания о современном состоянии устья Колымы дала серия экспедиционных гидрологических измерений (в 2017, 2019–2021 гг.), выполненных кафедрой гидрологии суши МГУ. Наибольший перечень измерений и охват объектов был в 2019 г. Экспедиция проводилась с 24 июля по 21 августа 2019 г. Экспедиционный отряд базировался на Северо-Восточной научной станции РАН в пос. Черский (см. рис. 1). Программа работ включала 1) рекогносцировочное обследование реки, устьев притоков, дельтовых рукавов, устьевого взморья; 2) непрерывный мониторинг уровней и температуры воды на 5 временных постах с использованием логгеров Solinst; 3) измерение скоростей течения и расходов воды с помощью доплеровского акустического профилографа RiverRay; 4) определение высотных отметок и уклонов водной поверхности при помощи GNSS приемников; 5) измере-

ние электропроводности и температуры воды зондом YSI Pro 30 по глубине и ширине потока в пределах устьевого участка Колымы; 6) отбор проб воды и наносов для гранулометрического и химического анализа, а также для определения весовой мутности воды; 7) установку в базовом створе седиментационных ловушек. За период экспедиционных работ было измерено 39 расходов воды в 24 створах, что позволило с опорой на водно-балансовые решения получить распределение расходов воды в основных узлах разветвлений исследуемого участка. В тех же створах проводились и другие гидрологические работы, в том числе съем-

ка распределения температуры и электропроводности, отбор проб воды на мутность и солевой состав.

Полевые работы проводились в период летне-осеннего паводочного сезона. До начала августа господствовал циклональный тип погоды с осадками, понижением температуры воздуха с 25 °С до 4 °С и сильными северными ветрами. В августе преобладал антициклональный тип сухой и теплой погоды. На ход уровней и расходов воды оказывали влияние сбросы из колымских водохранилищ. Амплитуда колебания уровней воды р. Колымы в створе пос. Черский составила около 60 см (рис. 2).



Рис. 1. Участок экспедиционных работ

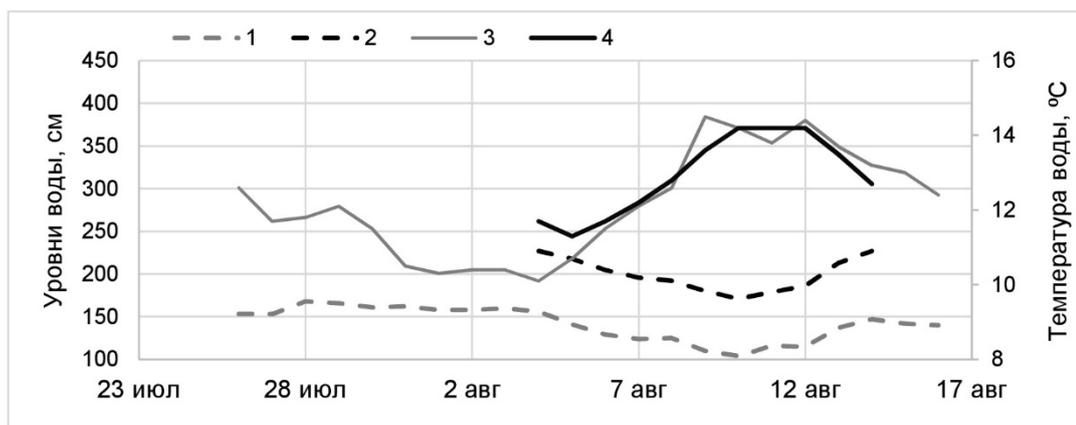


Рис. 2. Уровни и температура воды р. Колымы по данным логгеров. 1 – уровни воды в створе пос. Черский, 2 – уровни воды в створе с. Нижнеколымск, 3 – температура воды в створе пос. Черский, 4 – температура воды в створе с. Нижнеколымск.

В период экспедиции расходы воды в вершине дельты варьировались в диапазоне от 7210 до 10100 м<sup>3</sup>/с, осредненные по сечению скорости течения – от 0,4 до 0,6 м/с, коэффициент шероховатости составил 0,03. По данным 14 измерений построена кривая расходов воды, область применения которой ограничена заданным диапазоном значений и отсутствием сгонно-нагонных явлений. Устьевой участок Колымы представляет собой систему сложных разветвлений. Пойма и пойменные протоки на придельтовом отрезке играют мощную регулирующую роль. Она ранее была неизвестна. Две серии измерений на всем протяжении придельтового участка позволили эту роль немного прояснить, как и участие уникальной Стадухинской протоки. Известное представление о распределении колымских вод в дельте основывалось, прежде всего, на результатах гидравлических расчетов и аэродинамического моделирования (Гиляров, Иванов, 1967; Иванов, Котрехов, 1976; Пискун, 2002). Данные 2019 г. свидетельствуют о том, что самым водоносным рукавом является Каменная Колыма (ее доля ниже отделения Мархаяновской протоки при расходах воды в створе пос. Черский 7500–7700 м<sup>3</sup>/с составляет >70%). Также установлено, что Черноусовская и Мархаяновские протоки снизили свои доли, по сравнению с данными прошлых исследований.

По данным логгеров температура воды Колымы в базовом створе в период экспедиции менялась от 9,5 до 16,0°С, внутрисуточная изменчивость составила от 0,1 до 2,5°С. Было заметно неравномерное распределение температур воды по ширине потока. В летний период шлейф более холодных вод притоков (Омолон и Анюя) сохраняется на довольно протяженном участке. Разница температур воды у правого и левого берега составляет ниже устья р. Омолон – 1,5°С, ниже Анюя – 1,2°С, в створе пос. Черский – 1,0°С. Небольшие по водности притоки и протоки также оказывают влияние на температуру воды у берегов. Так в период антициклональной погоды теплые воды Пантелеихи, на которой расположен гидроствор поста Черский, обеспечили скачок температур воды в Колыме на 3,5°С. Такая разница температур воды по ширине реки приводит к ошибкам расчета теплового стока до 12%.

Согласно химическому анализу отобранных проб воды для Колымы в пределах придельтового участка характерна повышенная минерализация ( $\Sigma И = 140–160$  мг/л), воды гидрокарбонатные и кальциевые, с повышенным содержанием сульфатов. Для Омолона и Анюя минерализация ниже – 55–70 мг/л. Хотя электропроводность вод р. Колымы на придельтовом участке

снижалась от 200 до 160 мкСм/см, полного смешения колымских и омолоно-анюйских вод не происходит. В створе у пос. Черский разница между электропроводностью у левого и правого берега составляла 40–50 мкСм/см, а сумма ионов снижалась 26 июля с 125 до 83 мг/л, 10 августа – с 150–160 до 87–98 мг/л. В пределах дельтового участка проникновения соленых вод на глубине не обнаружено, но повышенное содержание ионов хлора отмечено в створе Край Леса и недалеко от бара Каменной Колымы.

В период экспедиции мутность воды Колымы заметно менялась по длине, ширине и глубине потока, а также во времени. На всех вертикалях максимальные значения мутности регистрировались в придонном горизонте. В механическом составе наносов на долю глин (средний диаметр <0,001 мм) приходится около 6% от массы пробы (в базовом створе), илов (0,001–0,01 мм) – 45%, пыли (0,01–0,1 мм) – 42%, песка (0,1–1 мм) – 4%, гравия (1–10 мм) – 3%. В период прохождения паводка доля илов и пылеватых частиц возрастает до 55% и 49%. Средний диаметр наносов составил 0,067 мм. Высокие значения мутности отмечены выше впадения р. Омолон (120 мг/л), в створе Дуванного Яра (350 мг/л) и в придонном слое у бара Каменной Колымы (55 мг/л). Мутность Омолона, Большого и Малого Анюя заметно ниже Колымы (6,5 мг/л, 4,6 мг/л и 9,4 мг/л соответственно), т.е. именно береговая термоэрозия, а не поступление наносов с водами притоков, служит основным фактором современного роста мутности в пределах исследуемого участка.

Получены хорошие связи между оптической и весовой мутностью, электропроводностью и минерализацией воды и др. В пределах устьевого участка выделены 2 обширные зоны смешения: на придельтовом отрезке (вод главной реки и ее правобережных притоков) и в дельте и на устьевом взморье (зона смешения речных и морских вод).

### Литература

1. Гиляров Н.П., Иванов В.В. Водный режим дельты реки Колымы по лабораторным исследованиям // Тр. ААНИИ. 1967. Т.278. С. 22–38.
2. Иванов В.В., Котрехов Е.П. Опыт численного моделирования неустановившегося движения воды в многорукавной дельте реки // Тр. ААНИИ. 1976. Т.314. С. 16–35.
3. Пискун А.А. Методика расчета водного и руслового режима в сложно разветвленных дельтах рек при отсутствии данных наблюдений за русловыми деформациями. СПб., 2002. 155 с.

## ДИНАМИКА ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ НАЛЕДЕЙ НА УЧАСТКЕ ИЕНГРА-ЧУЛЬМАН (ЮЖНАЯ ЯКУТИЯ) ФЕДЕРАЛЬНОЙ АВТОДОРОГИ А-360 «ЛЕНА»

Н.Е. Баишев

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия,  
nyurgunbaishev@mail.ru*

В статье представлены результаты исследований многолетней (5 лет) и внутригодовой динамики природно-техногенных наледей, формирующихся на федеральной автодороге А-360 «Лена» на участке от р. Иенгра до р. Чульман. При изучении многолетней динамики наледей оценивались изменения их площади в зависимости от суммы отрицательных температур воздуха, мощности снежного покрова и суммы жидких осадков, полученных на метеостанции пос. Чульман. При исследовании внутригодовой динамики наледей рассматриваются периоды увеличения и уменьшения мощности наледи под мостовым переходом автодороги.

*Ключевые слова:* динамика наледей, автодорога «Лена», Sentinel-2a, NDSI, автоматизированная фотокамера

The article presents the results of studies of long-term (5 years) and intra-annual dynamics of natural-technogenic icing (naled or aufeis) formed on the Lena Highway on the section from the river Iengra to river Chulman. When studying the long-term dynamics of icing, changes in their area were estimated depending on the sum of negative air temperatures, the thickness of the snow cover and the amount of liquid precipitation received at the weather station of the village Chulman. When studying the intra-annual dynamics of icing, the periods of increase and decrease in the capacity of icing under the bridge crossing of the highway are considered.

*Keywords:* icing dynamics, Lena Highway, Sentinel-2 satellite image, NDSI, automated photo camera

Строительство, эксплуатация и реконструкция инженерных сооружений в криолитозоне неизбежно нарушают природные условия и формируют уникальные природно-техногенные системы. В этих системах взаимодействие природных процессов и явлений с инженерными объектами имеет весьма сложный характер. В частности, техногенное воздействие на криолитозону приводит к нарушению стока поверхностных и подземных вод, в результате чего могут формироваться наледи на тех участках, где раньше их не было, а также трансформироваться морфометрические параметры, режимы формирования и стаявания существующих природных наледей (Алексеев, 2017; Иванова, Самсонова, 2019; Казаков, 1976; Савко, 1973; Шушаков, 1979 и др.). Такие наледи называются природно-техногенными (Шепелёв, 2007).

В южной части Восточной Сибири, где проходит федеральная автодорога А-360 «Лена» (ФАД «Лена»), гидрогеогенные наледи достаточно широко распространены (Гидрогеология СССР, 1970; Козлов, Трутнев, Кезина, 2010). По имеющимся фондовым материалам, относительно узкая полоса ФАД «Лена», от пос. Невер (Сковородинский район, Амурская область) до г. Томмот (Алданский район, Республика Саха (Якутия)), подразделяется на многоналедные, наледные, малоналедные и безналедные участки (Петров, 1930; Алексеев, Усов, 1961). По данным (Баишев, Шепелёв, Гагарин, 2021) самыми распространенными наледями в полосе ФАД «Лена» от Невера до Томмота являются средние и большие по площади (табл. 1). На исследуемом участке также количественно преобладают наледи III и IV категорий (табл. 1).

Размеры наледей V категории в внутригодовом цикле зависят от значения температуры воздуха, количества атмосферных осадков и мощности слоя сезонного протаивания (Бойцов, 1979), а многолетняя их динамика не была исследована. Также не изучены внутригодовая и многолетняя динамика наледей III и IV категорий. Тогда как на территории Южной Якутии эксплуатируются автомобильные и железные дороги, нефтепровод, газопровод и линии электропередач. Более того установлено, что на обширных территориях Сибири и Дальнего Востока 50–80% из общего количества наледей, формируются после строительства земляного полотна, мостовых переходов и водопропускных труб (Шушаков, 1979).

Целью исследования является изучение многолетней и внутригодовой динамики природно-техногенных наледей на участке Иенгра-Чульман ФАД «Лена».

Для выявления природно-техногенных наледей на автодороге, по данным космоснимков с готовой атмосферной корректировкой Sentinel-2, был использован критерий – расширение наледи выше по течению рек и ручьев от ФАД «Лена» (рис. 1).

Для исследования многолетней динамики природно-техногенных наледей нами был выбран метод дистанционного зондирования Земли. В частности, использован стандартизованный индекс различий снежного/ледового покрова (англ. Normalized Difference Snow Index – NDSI), определяемый по данным космоснимков. Нами используются космоснимки с атмосферной корректировкой Sentinel-2 в период схода снежного покрова (конец апреля и начала мая 2017-2021 годов). Расчет NDSI подробно описан в работах (Макарьева и др., 2019; Crites, Kokelj, Lacelle, 2020).

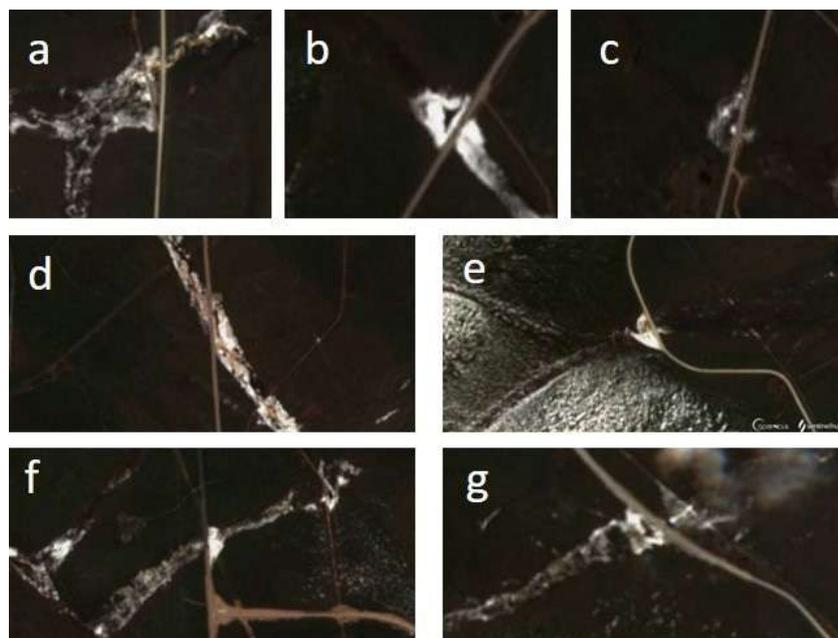


Рис. 1. Природно-техногенные наледы на участке Иенгра-Чульман.  
*a* – наледь на р. Горбыллах; *b* – наледь на р. Оборчо; *c* – наледь на р. Юркин; *d* – наледь на р. Амнуннакта; *e* – наледь на р. Ахиточи; *f* – наледь на 1-й руч. б/н (приток р. Амнуннакта); *g* – наледь на р. Аччыгый Горбыллах. Дата космоснимка Sentinel-2: 18 мая 2017 г.

Таблица 1. Категоризация наледей на ФАД по площади согласно классификации В.Г. Петрова

Категория	Наименование	Площадь, кв. м	Количество наледей на отрезке Невер-Томмот	Количество наледей на отрезке Иенгра-Чульман	Количество ПТН на отрезке Иенгра-Чульман
I	Очень малые	$<10^2$	0	0	0
II	Малые	$10^2-10^3$	6	1	1
III	Средние	$10^3-10^4$	42	4	0
IV	Большие	$10^4-10^5$	49	5	4
V	Очень большие	$10^5-10^6$	10	2	2
VI	Гигантские	$>10^6$	0	0	0

Примечание: ПТН – природно-техногенная наледь.

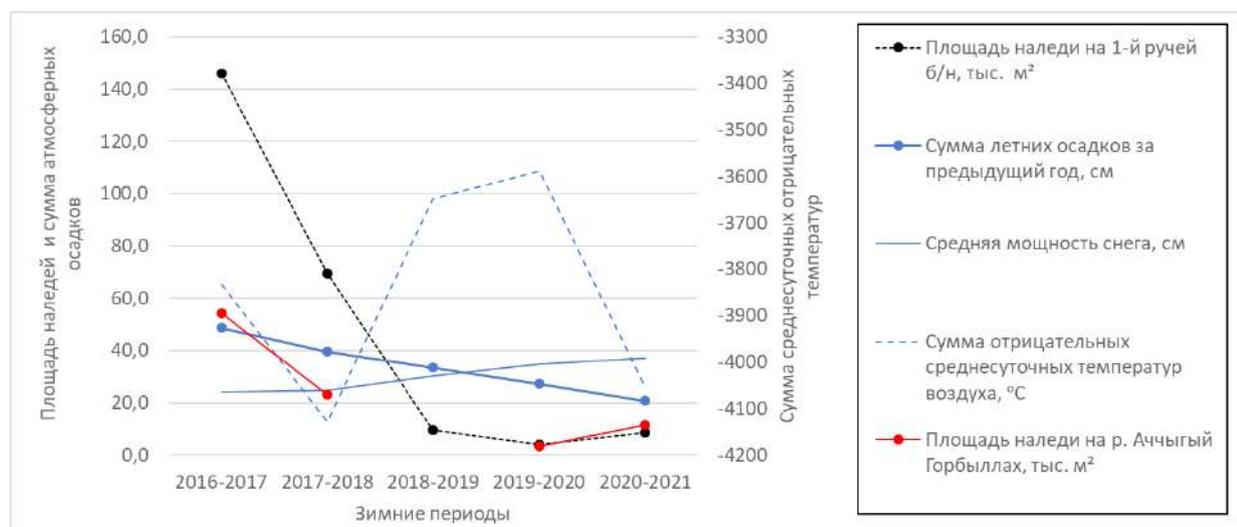


Рис. 2. Многолетняя динамика природно-техногенных наледей на ФАД «Лена»

Полученные данные о многолетней динамике природно-техногенных наледей анализировались вместе с суммой температуры воздуха и количеством зимних и летних атмосферных осадков, полученными с метеостанции Чульман. Для оценки влияния климатических условий на наледь в многолетнем цикле.

Без проведения детальных исследований за динамикой наледообразующих вод, возможно определить генетические типы и виды наледей на основе кривых относительных приращений объемов наледей (Пигузова, Шепелёв, 1975). Для наблюдения за внутригодовой динамикой мощности наледи, формируемой под мостовым переходом через р. Горбыллах (рис. 1, а), были установлены ледомерные вехи и автоматизированная фотокамера KeerGuard 762 NV с автоматизированной фотосъемкой с 11 ч 30 мин до 13 ч 00 мин и с 15 ч 00 мин до 17 ч 00 мин с интервалом 30 мин.

На отрезке Иенгра-Чульман к природно-техногенным наледям относятся 7 наледей (табл. 1), формирующиеся на участках переходов автодороги через реки и ручьи, в результате барражирования потока поверхностных и подземных вод автодорогой в зимний период.

Результаты исследований многолетней динамики (зимние периоды с 2016-2017 по 2020-2021 гг.) природно-техногенных наледей на ФАД «Лена» (рис. 1, f, g) показали, что с уменьшением суммы суточных летних осадков предыдущего года и с увеличением средней мощности снега площадь наледей уменьшается. Влияние суммы отрицательных среднесуточных температур за эти годы не удалось однозначно оценить

(рис. 2). Видимо здесь необходимо провести ряд измерений температуры грунтов на наледных участках для оценки влияния мощности слоя сезонного протаивания и промерзания на наледообразовательный процесс (Бойцов, 1979).

Исследование внутригодовой динамики мощности наледи, формируемой под мостовым переходом через р. Горбыллах показали, что наледообразовательный процесс начинается в конце декабря. В начале января 2021 г. наледь имела мощность 0.7 м. Максимальную мощность (1.6 м) наледь достигла в середине апреля 2021 г. Мощность наледи интенсивно росла с 15 декабря 2020 г. по 1 января 2021 г. Далее наледообразовательный процесс продолжался до конца февраля 2021 г. С 1 марта по 15 апреля 2021 г. наледь снова начала интенсивно расти. Разрушение её началась с середины мая 2021 г. В конце июня эта наледь полностью растаяла (рис. 3, а).

Двухпиковый режим прироста мощности наледи (рис. 3, b) свидетельствует о том, что с 15 декабря 2020 г. до 1 января 2021 г. её объем увеличивался за счет грунтовых вод, разгружающихся под воздействием криогенного напора, вызываемого зимним промерзанием водоносных пород. С 1 марта до 15 апреля 2021 г. прирост размеров наледи происходил за счет подземных вод глубокой циркуляции, разгружающихся под воздействием напорного гидравлического градиента. Отсюда можно заключить, что наледь, формируемая на участке мостового перехода через р. Горбыллах (рис. 1, а), имеет смешанный генезис.

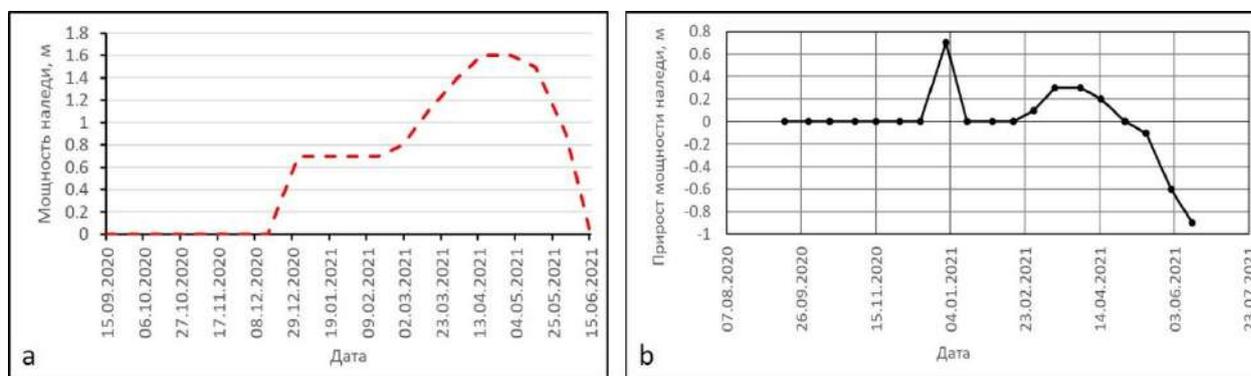


Рис. 3. а – рост и таяние наледи на ФАД «Лена» в переходе через р. Горбыллах; б – прирост мощности наледи на мостовом переходе ФАД «Лена».

### Литература

1. Алексеев В.Р., Усов В.А. Наледи Амуро-Якутской магистрали в зиму 1959–1960 гг. и состояние борьбы с ними. Чульман: Изд. ИМЗ СО АН СССР АНИМС, 1961. 93 с.
2. Алексеев В.Р. Проблемы инженерного освоения наледных участков речных долин // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 6. С. 65–75.
3. Баишев Н.Е., Шепелёв В.В., Гагарин Л.А. О закономерностях распространения наледей на федеральной автодороге А-360 «Лена» по данным мультиспектральных космических снимков // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2021, т. 26, № 1, С. 60–69.
4. Бойцов А.В. Динамика образования средних по размерам наледей в Южной Якутии // Исследование наледей, Якутск: издание Института мерзлотоведения СО АН СССР, 1979, С. 97–104.
5. Гидрогеология СССР, том XX, Якутская АССР. Якутское геологическое управление. Институт мерзлотоведения СО АН СССР. М., изд-во «Недра», 1970, 384 стр.

6. Иванова Л.Д., Самсонова В.В. Формирование техногенных наледей на линейных сооружениях в пределах Приленского плато // Сергеевские чтения. Эколого-экономический баланс природопользования в горнопромышленных регионах: сборник научных трудов (по материалам годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (2-4 апреля 2019 г.). М., 2019. С. 423–427.
7. Казаков А.П. Исследование наледей на автомобильных дорогах Сибири и Дальнего Востока // Записки Забайкальского филиала географического общества СССР. 1976. Вып. 101. С. 124–151.
8. Козлов К.Г., Трутнева Н.В., Кезина Т.В. Экзогенные процессы рельефообразования, развитые на территории Амурской области. Наледи // Вестник Амурского государственного университета: материалы Междунар. симпоз. 2010. Вып. 49: Сер. Естественные и экономические науки. С. 92–96.
9. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным // Лёд и Снег. 2019. Т. 59 № 2. С. 201–212.
10. Румянцев Е.А. Сфера и эффективность применения различных типов противоналедных мероприятий на железных дорогах // Наледи Сибири и Дальнего Востока: Сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1981. С. 198–205.
11. Савко Н.Ф. Влияние инженерных сооружений на процессы наледеобразования // Записки Забайкальского филиала географического общества СССР, вып. 92. Краткие тезисы докладов к предстоящей второй научно-производственной конференции по строительству на мерзлых грунтах, часть 2 (проблемы наледеобразования). Чита, 1973. С. 133–135.
12. Петров В.Г. Наледи на Амурско-Якутской магистрали, с альбомом планов наледей. Ленинград: Изд. АН СССР и НИАДИ НКПС СССР, 1930. 177 с.
13. Пигузова В.М., Шепелёв В.В. Методика изучения наледей. Якутск: Изд-во ИМЗ АН СССР, 1975. 62 с.
14. Шепелёв В.В. Наледи // Якутия: историко-культурный атлас. Москва: Изд-во Феория, 2007. С. 88–89.
15. Шушаков Е.В. Наледи и борьба с ними (БАМ. В помощь строителям). Москва: Изд-во «Транспорт», 1979. 63 с.
16. Crites, H., Kokelj, S.V. & Lacelle, D. Icings and groundwater conditions in permafrost catchments of northwestern Canada. *Sci Rep* 10, 3283 (2020).

УДК 551.32

## КАТАЛОГ ЛЕДНИКОВЫХ ОЗЕР БОЛЬШОГО КАВКАЗА

С.А. Бондарев, В.М. Кидяева

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия,  
sergeybondarev97@gmail.com*

В рамках работы создана геоинформационная база данных ледниковых озер российской и зарубежной территории Большого Кавказа. В автоматическом и ручном (визуальном) режимах дешифрирования выделено 967 озер, расположенных в высотном диапазоне от 500 до 4000 м. Выполнена оценка общей площади (14,8 км<sup>2</sup>) и суммарного объема (0,08 км<sup>3</sup>) ледниковых озер. Была определена погрешность при оценках площади ( $\pm 5...8\%$ ) и объема ( $\pm 30\%$ ).

*Ключевые слова: ледниковое озеро, Кавказ, дистанционное зондирование Земли*

As part of the work, a geoinformation database of glacial lakes in the Russian and foreign territories of the Greater Caucasus has been created. In the automatic and manual (visual) modes of interpretation, 967 lakes were identified, located in the altitude range from 500 to 4000 m. The total area (14.8 km<sup>2</sup>) and the total volume (0.08 km<sup>3</sup>) of glacial lakes were estimated. Errors were determined in assessing the area ( $\pm 5 \dots 8\%$ ) and volume ( $\pm 30\%$ ).

*Keywords: glacial lake, Caucasus, remote sensing*

В настоящее время отступление ледников на Большом Кавказе приводит к нарушению устойчивости ледниковых озер, в случае прорыва которых возможно формирование селевых потоков. В связи с этим важно создать базу данных ледниковых озера региона с актуальными данными. Материалы прошлых аналогичных работ охватывали не весь регион или уже не актуальны.

Каталог ледниковых озер Западного, Центрального и Восточного Кавказа создавался с использованием материалов и методов анализа дистанционного зонди-

рования. В ходе работы также анализировалась территория Южной Осетии и Грузии.

Дешифрирование ледниковых озер проводилось с использованием групп разновременных снимков: Sentinel-2 за 2017–2019 гг. (разрешение до 10 м), SPOT-6 за 2017 г. (разрешение до 1,8 м) и Pleiades-1 за 2019 г. (с разрешением до 0,7 м). Космоснимки Sentinel-2 охватывают всю территорию Кавказа. Изображения SPOT-6 и Pleiades-1 содержат информацию только об отдельных ледниковых бассейнах районов Приэльбру-

сья, Безенги и Казбекско-Джимарайского массива.

Оконтуривание береговой линии горных озер происходило с использованием двух режимов дешифрирования – автоматизированного и ручного (визуального). Автоматизация дешифрирования достигается использованием спектральных индексов для поиска водных объектов: NDWI (Normalized Difference Water Index), MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) и AWEI (Automated Water Extraction Index). Корректировка результатов производилась преимущественно в ручном режиме дешифрирования с использованием космоснимков в псевдоцветах.

Ошибка, возникающая при оценке площади озер на этапе дешифрирования, рассчитывалась как произведение периметра озера на размер половины пикселя раstra снимка на местности. Такая оценка погрешностей часто используется при работе с данными дистанционного зондирования (O’Gorman, 1996; Petrakov et al., 2016).

При анализе цифровых моделей рельефа (ЦМР) определены высотные отметки урезов воды над уровнем моря. Были использованы ЦМР SRTM и ASTER GDEM (с разрешением 30 м у обеих моделей) и ЦМР, созданная на основе стереопары космических снимков SPOT-6 (разрешение 3,2 м).

Для дополнительного понимания распределения озер Кавказа в прошлые десятилетия были использованы топографические карты Генштаба (масштаб 1:100 000) в формате растровых изображений.

Оценка объема ледниковых озер сделана на основе эмпирической формулы, в соответствии с которой величина объема горного озера определяется на основе

значения площади озера и известных региональных условий (Кидяева, 2014).

В ходе инвентаризации ледниковых озер Западного, Центрального и Восточного Кавказа суммарно было выделено 967 озер, расположенных в высотном диапазоне от 500 до 4000 м. Почти половина озер (48%) расположены выше 2000 м.

Согласно оценкам площади и объема ледниковых озер, были определены следующие величины: среднее значение площади (24,5 тыс. м<sup>2</sup>) и объема (150 тыс. м<sup>3</sup>) одного озера, суммарные площадь (14,8 км<sup>2</sup>) и объем (0,08 км<sup>3</sup>) всех озер кавказского региона. Погрешности при определениях площади и объема составили ± 5...8 % и ± 30 % соответственно.

### Литература

1. Кидяева В.М. Оценка потенциальной опасности при прорывах горных озёр. Диссертация на соискание ученой степени к.г.н. МГУ имени М.В. Ломоносова. Москва, 2014.
2. O’Gorman, L. Subpixel precision of straight-edged shapes for registration and measurement. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18 (7), pp. 746–751 (DOI: 10.1109/34.506796).
3. Petrakov D.A, Shpuntova A.M, Aleinikov A.A, Kääb A., Kutuzov S.S, Lavrentiev I.I, Stoffel M., Tutubalina O.V, Usabaliev R. Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, Inner Tien Shan, during 2003–2013. *Science of the Total Environment*, 2016, 562, pp. 364–378 (DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.03.162)

УДК 551.324.6

## ВНУТРИСТРУКТУРНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ БОЛЬШОГО АЛТАЯ

П.С. Бородавко<sup>1,2</sup>, О. Демберел<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский госуниверситет, Томск, Россия, bor@ggf.tsu.ru

<sup>3</sup>Ховдский государственный университет, Ховд, Монголия, icescor\_ot@yahoo.com

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и МОКНСМ в рамках научного проекта № 20-55-44008

На основе геоинформационного анализа и наземных экспедиционных исследований в эталонных горно-ледниковых бассейнах Русского и Монгольского Алтая выведен алгоритм расчета внутривидовой перераспределения водозапаса из гляциальных (в водном эквиваленте) в лимнические системы для заданного временного интервала.

*Ключевые слова:* оледенение, ГИС, водные ресурсы, озера

Based on GIS analysis and ground-based expeditionary studies in the reference mountain-glacial basins of the Russian and Mongolian Altai, an algorithm for calculating intrastructural redistribution of water storage from glacial (in water equivalent) to limnic systems for a given time interval was derived.

*Keywords:* glaciation, GIS, water resources, lakes

Со времени Малой ледниковой эпохи, известной как оледенение 17–19 веков, высотный и широтный диапазон распространения криогенных образований Земли неуклонно сужается и выражается в прогрессирующем сокращении гляциосферы. Подчиняясь глобальным климатическим тенденциям, оледенение Большого Алтая на протяжении полутора столетий находится в стадии устойчивой регрессии, а ледники его основных центров демонстрируют отрицательный баланс массы и уменьшают занимаемую площадь. Процесс современной деградации оледенения Большого Алтая сопровождается формированием приледниковых озерных систем, количество которых возрастает пропорционально темпам сокращения оледенения. В рамках фундаментальной научной проблематики данная тенденция определяется как внутривидовая трансформация статических водных ресурсов, выраженная в направленном перераспределении водозапаса из ледниковых в озерные системы.

Для систематизации, хранения, аналитической обработки и отображения пространственно координированных данных о внутривидовой трансформации статических водно-ледниковых ресурсов Большого Алтая участниками проекта была разработана геоинформационная система AIWaRes (Altai Water Resources) (рис. 1). ГИС AIWaRes разрабатывалась на персональных компьютерах на базе Intel процессоров в операционной среде Windows 7.0®. В качестве прикладного программного обеспечения использовались разработки компаний Petmar Trilobite Breeding Ranch® и Blue Marble Geographics®.

В качестве основного программного обеспечения ГИС был выбран комплекс программных средств

Microdem/TerraBaseII V12.0 и Global Mapper V 16.0® успешно работающих со всевозможными форматами геоданных и использующих преимущества работы в локальной сети по технологии «клиент-сервер». Microdem/TerraBaseII и Global Mapper V 16.0® предназначены для конечного пользователя и представляют собой простые и эффективные средства для доступа, визуализации, анализа и хранения пространственных данных. Структура ГИС AIWaRes включает: банк данных, программно-аппаратный комплекс и средства создания оперативных материалов для разработки прогнозных заключений. Банк данных служит информационной основой ГИС AIWaRes, его состав и организация были определены составом входных и выходных данных, необходимых для решения функциональных задач по теме проекта. Банк данных состоит из картографического архива, тематических баз данных в формате DBase и материалов дистанционного зондирования. Векторные цифровые карты в ГИС представлены в формате Shape-файлов. Наличие цифровой топографической основы позволило привести к единой системе координат цифровые тематические карты и материалы дистанционного зондирования. В качестве цифровой модели рельефа используются планшеты Aster GDEM, SRTM матриц третьего поколения и DTED level 3. Фактологические данные в ГИС AIWaRes представлены совокупностью отдельных тематических баз данных, атрибутивных таблиц цифровых слоев в виде файлов формата DBase и газетиров (географических справочников) в текстовом формате. Структура тематических баз данных создавалась по реляционному типу, означающему, что вся информация в них формализуется в виде таблиц.



Рис. 1. Программный интерфейс геоинформационной системы AIWaRes

Картирование современных границ ледников и моренных комплексов малой ледниковой эпохи производилось оцифровкой инструментами Microdem/TerraBaseII V12.0 в режиме "Stream" по растровой подложке летних сцен мультиспектральных Канопус-В МСС, Ресурс-П Геотон Мультиспектр и монохромных космических изображений (авторизованный файловый архив ЦОД Геопортала Роскосмоса, <https://gptl.ru/>) с пространственным разрешением от 1 до 3,5 м за период с 2017 по 2020 гг. Все имеющиеся сцены в формате GeoTiff были преобразованы в единую картографическую проекцию (45 зона UTM, WGS84), геотрансформированы с помощью матриц Aster GDEM и координат реперных точек, подготовленных в ходе проведения полевых экспедиционных исследований. Для минимизации ошибок картографирования замороженных участков краевых частей ледников использовались GPS треки их контуров, с точностью позиционирования до 1 м. Пространственное положение ледников середины 60-х годов XX века картировалось по монохромным геотрансформированным и геореферированным электронным скан-копиям отпечатков космоснимков миссии Corona (KH-2, KH-3) (авторизованный файловый архив ДДЗ USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Расчет 3D площадей ледников проводился в Global Mapper V 16.0® с использованием цифровой модели рельефа ASTER GDEM третьего поколения с разрешением 1 arcsec. Объемы ледников рассчитывались по эмпирическим зависимостям полученными сотрудниками Института географии РАН (Мачерет и др, 2013) с коэффициентами, рекомендованными для разных морфологических типов ледниковых образований.

Озерное покрытие горно-ледниковых бассейнов Южно-Чуйского, Цамбагарав, Курайского и Чихачевского центров оледенения картировалось по прямым признакам дешифрирования мультиспектральных и панхроматических космоснимков высокого и сверхвысокого разрешения. Главными дешифровочными признаками озерных водоемов являлись: ровный фототон и специфическая монотонная или выразительная структура изображения воды; овальная форма озер и приуроченность водоемов к пониженным элементам рельефа. Озера картировались, когда становилась различимой их форма. Основные гидрографические характеристики водоемов (площадь акватории, длина береговой линии, отметка уреза) рассчитывались

программными средствами ГИС. Объемы озерных вод рассчитывались по зависимостям К. Хюгелля (Huggel et al, 2002) и С. Эванса (Evans, 1986)

$$V=0.104A^{1.42} \quad (1)$$

$$V=0.035A^{1.5} \quad (2)$$

где V – объем воды, A – площадь водоема.

Для верификации полученных значений была проведена батиметрическая съемка восьми эталонных озер: Верхнего Аккольского, Аккол\_5, Аккол\_6, Кызыл-Кая\_1, Караколь\_2 (Южно-Чуйский центр оледенения), Кок-Коль, Каменстое (Чихачевский центр оледенения), Черное (Курайский центр оледенения). Измерения проведены с помощью сонара GPSMAP 585 Plus со встроенным GPS ресивером. Результаты эхолотирования обработаны в Garmin Quickdraw Contours на основании чего были построены карты глубин водоемов и установлены их истинные объемы. Невязка измеренных объемов с рассчитанными по формуле (1), составила в среднем  $\pm 15\%$ , по формуле (2)  $\pm 12\%$ .

На основе геоинформационного анализа и наземных экспедиционных исследований в эталонных горно-ледниковых бассейнах выведен алгоритм расчета внутрискрутурного перераспределения водозапаса из гляциальных (в водном эквиваленте) в лимнические системы. В процентном выражении имеющий вид (3):

$$\frac{\Delta V_{gl} - V_{\Sigma lim}}{V_{\Sigma lim}} / 100 \quad (3)$$

где  $\Delta V_{gl}$  – разница объемов современного ледника и ледника в пространственных границах малой ледниковой эпохи,

$V_{\Sigma lim}$  – суммарный объем воды в озере или озерной системе, расположенной в пределах зоны дегляциации малой ледниковой эпохи.

### Литература

1. Мачерет Ю.Я., Кутузов С.С., Мацковский В.В., Лаврентьев И. И. Об оценке объема льда горных ледников // Лед и снег. 2013. № 1 (121). С. 5–15.
2. Evans S.G. Landslide damming in the Cordillera of Western Canada // Landslide dams: processes, risk, and mitigation / Ed. Schuster A. L. American Society of Civil Engineers Geotechnical Special Publication. 1986. No 3, pp. 111–130.
3. Huggel C., Kaab A., Haerberli W., Teysseire P., Paul F. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps // Can. Geotech. J. 2002. V, 39, pp. 316–330.

## ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА СКОРОСТИ ВОДНОГО ПОТОКА В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

С.В. Бузмаков, А.А. Зорина, А.В. Юхно, А.А. Кулешов

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия,  
s.buzmakov@hydrology.ru

Проведены сравнительные измерения скорости течения и расходов воды устройствами различных типов на реках Нева и Обь в зимних условиях. Приводится анализ преимуществ и недостатков применения электромагнитных датчиков по сравнению с гидрометрической вертушкой и доплеровским профилографом.

*Ключевые слова:* расход воды, электромагнитный датчик скорости водного потока, коэффициент шероховатости нижней кромки льда, гидрометрическая вертушка, акустический доплеровский профилограф течений.

Comparative measurements of the current velocity and water discharge were performed with devices of various types on the Neva and Ob rivers in winter conditions. An analysis of the advantages and disadvantages of using electromagnetic sensors in comparison with a mechanical current meter and a Doppler profiler is given.

*Keywords:* water discharge, electromagnetic current meter of water flow velocity, roughness coefficient of the lower ice edge, hydrometric mechanical current meter, acoustic Doppler current profiler ADCP.

### Введение

Одной из самых трудоёмких гидрологических полевых работ является измерение расхода воды в зимних условиях. Часто такие работы сопровождаются сильными морозами, шквальным ветром, большой толщиной снежного покрова и наличием полыней, препятствующих безопасному и свободному перемещению людей и техники по льду. В таких тяжелых условиях необходимо очистить лёд от снега, пробурить лунки на скоростных и промерных вертикалях, определить общую глубину потока, толщину ледяного покрова (ЛП) и слоя шуги, измерить скорости течения на разных глубинах. С учётом того, что зимой световой день имеет наименьшую продолжительность, на больших реках измерение расхода воды часто производится в два дня. В первый день расчищается и размечается створ и бурятся лунки, во второй - измеряют скорости течения.

В процессе измерения необходимо поддерживать в рабочем состоянии средство измерения скорости потока. Движущиеся части гидрометрической вертушки между измерениями на скоростных вертикалях, как правило, помещаются в ведро с водой. Вторичный преобразователь (контроллер) прячут под одежду или устанавливают в обогреваемый контейнер, но даже несмотря на это большинство применяемых электронных преобразователей при сильных морозах перестают работать корректно.

В процессе модернизации гидрологической сети Росгидромета наряду с гидрометрическими вертушками на гидрологические станции и посты были поставлены акустические доплеровские профилографы и электромагнитные датчики скорости водного потока. Внедрение этих приборов было направлено, в основном, на ускорения процесса измерения и повышения точности его результатов.

Если методика измерения расхода воды гидрометрической вертушкой давно разработана и испытана

(Наставление вып.2. ч.II; Наставление вып.6. ч.I; Дополнение к наставлению РД 52.08.163-88), то по применению профилографов и электромагнитных датчиков методических рекомендаций практически нет. Единственным исключением является РД 52.08.767-2012, который был разработан на основе программного обеспечения лишь одного производителя приборов и не включает в себя алгоритм измерений в период ледостава. Методика измерений расхода воды электромагнитным датчиком почти полностью дублирует вертушечные измерения, но и в ней появляются нюансы.

Материалы и методы исследования

В основе исследования лежат единичные сравнительные измерения скорости течения и расходов воды устройствами различных типов, проведённые на реках Нева и Обь в зимний сезон 2020–2021 гг.

В исследовании были использованы следующие средства измерения:

1. вертушка гидрометрическая ИСВП-ГР-21М1 (только для р.Нева);
2. измеритель скорости водного потока (ИСВП) «Посейдон-1»;
3. профилограф акустический доплеровский River Surveyor M9.

Гидрометрический створ на реке Нева располагался в посёлке имени Свердлова. Ширина русла 300 м, средняя скорость течения 0,80 м/с, максимальная глубина 10,7 м. Измерения скорости течения гидрометрической вертушкой и электромагнитным датчиком производилось с троса на 13 скоростных вертикалях в 72 точках. При этом датчики были расположены друг над другом. Сначала производились измерения гидрометрической вертушкой, затем в ту же точку выводился электромагнитный датчик. Профилограф опускался в лунки на специализированной штанге под нижнюю кромку льда. Расчёт расхода производился в програм-

ме River Surveyor Stationary Live методом «секций».

Измерения на реке Обь (протока Вартовская) производились у города Нижневартовск. Ширина русла 396 м, максимальная глубина 19,8 м, средняя скорость течения 0,23 м/с. Профилограф также опускался в лунки на специализированной штанге под нижнюю кромку льда. Измерения электромагнитным датчиком производилось только в верхней части эпюры скоростей – до 3 м от верхней кромки льда. Датчик опускался жестко закрепленным на штанге без стабилизатора направления на 15 скоростных вертикалях в 110 точках, при этом в каждой точке производилось по 3 измерения осреднением в 20 секунд с небольшим изменением угла направления оси датчика к поперечному сечению реки с дальнейшим выбором максимального из полученных значений.

### Результаты исследования, их анализ и выводы Река Нева

Различие в расходах воды, измеренных тремя датчиками, составило менее 2% (табл.1). На рис. 1 представлен поперечный профиль русла реки с распре-

лением разностей в измеренных скоростях течения различными датчиками. Диапазоны скорости на иллюстрации представляют собой погрешность (%) от средней скорости потока 0,8 м/сек, диапазон 0,04–0,04 это 5% расхождения между средствами измерения; 0,04–0,08 – до 10%; 0,08–0,12 – до 15%; 0,12–0,16 – до 20%; 0,16–0,24 – до 30%; 0,24–0,32 – до 40%; свыше 0,32 – более 50%. Основные различия наблюдаются в придонном слое. Если отклонение значений по профилографу можно объяснить отсутствием непосредственных измерений в придонной «слепой зоне», то отклонение данных электромагнитного датчика и гидрометрической вертушки не имеет однозначной трактовки. По мнению авторов это явление может быть объяснено тем, что косоструйность течения вблизи дна выше, что повышает погрешность обоих средств измерения. Несмотря на то, что различия в придонных скоростях могут значительно различаться, на значение средней скорости и соответственно расход воды это почти не сказывается. Эпюры скоростей (рис. 2) также имеют схожий, местами полностью идентичный характер как на стрежне, так и у берегов.

Таблица 1. Сравнительные характеристики измеренных расходов воды на гидростворе р.Нева – пос.им.Свердлова за 12 марта 2021 г.

Характеристика	ИСВП-ГР-21М1	Посейдон-1	RiverSurveyor M9
Площадь сечения, м <sup>2</sup>	2340	2340	2440
Средняя скорость м/с	0,815	0,817	0,799
Максимальная скорость м/с	1,224	1,233	1,188
Расход воды, м <sup>3</sup> /с	1909	1914	1949

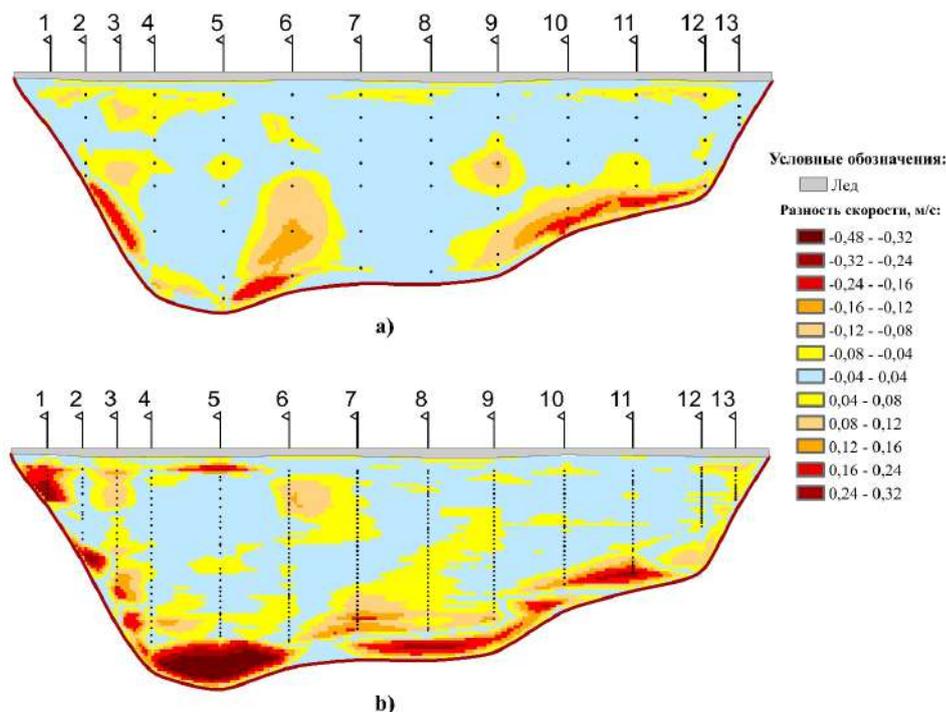


Рис.1. Графически представленная разность скоростей течения для р. Нева - пос. им. Свердлова между: а) ГР21-М1 и Посейдон, б) ГР21-М1 и River Surveyor M9.

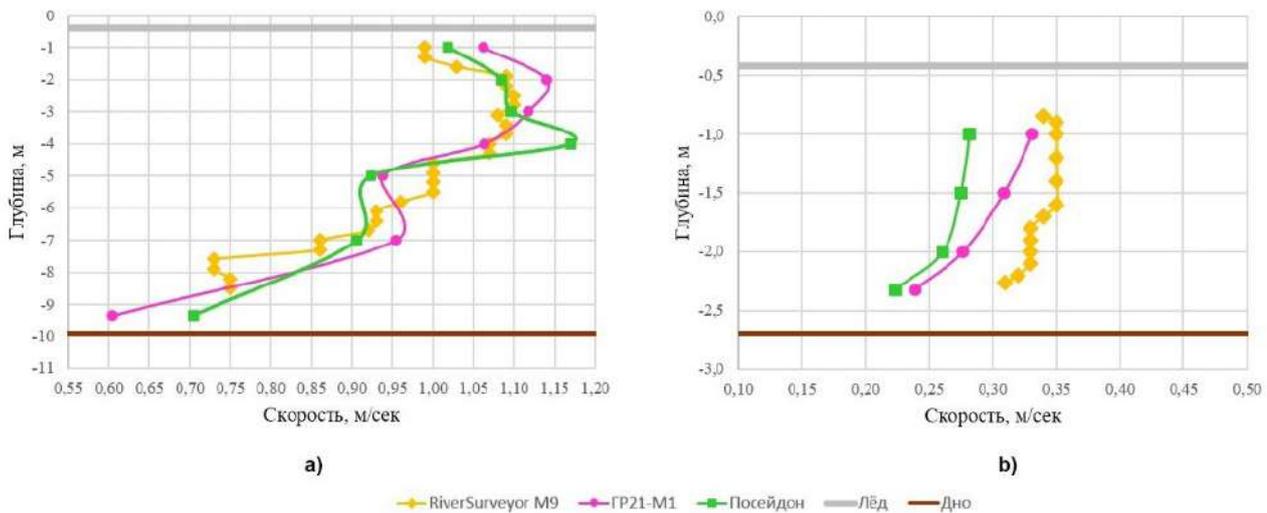


Рис. 2. Распределение скоростей течения по глубине на скоростной вертикали: а) №4, б) №13.

Основной недостаток применения датчика Посейдон-1 заключается в том, что он фиксирует скорость потока только перпендикулярно оси самого датчика. Таким образом, если выставить его не строго по течению, то показания скорости будут занижаться пропорционально углу несоответствия. В условиях подлёдных измерений, когда возможность визуально наблюдать датчик отсутствует, а сам датчик опускается на тросе, этот недостаток приобретает главенствующую роль. Если скорости течения в реке не способны повернуть датчик с помощью стабилизатора направления строго по течению, то не рекомендуется производить измерения с троса.

Основными преимуществами Посейдон-1 перед гидрометрической вертушкой являются:

- его небольшие габариты. В полностью собранном состоянии (с установкой стабилизатора направления) длина составляет 450 мм. Длина гидрометрической вертушки модели ИСВП-ГР-21М1, ИСП-1М, ГР-21М составляет 540 мм. Данное преимущество уменьшает трудозатраты на бурение лунок – достаточно пробурить две смежные лунки дюймовым шнеком. Однако, в данном аспекте удобнее всего измерять профилографом М9 (габаритный диаметр которого 130 мм), для которого достаточно всего одной лунки.
- отсутствие движущихся частей. Это особенно актуально для шугоносных рек, когда лопастной винт может повредиться о внутриводный лед. Также можно устанавливать датчик Посейдон-1 вплотную ко льду или дну потока, что очень важно для водотоков с рабочей глубиной менее 10 см.
- вторичный преобразователь Посейдон-1 более морозоустойчив, чем преобразователи ИСВП-ГР-21М1 и ИСП-1М.
- фиксация скоростей начинается с 1 см/сек (гидрометрическая вертушка – от 6 см/сек)

## Река Обь

Электромагнитный датчик в данной работе использовался для определения коэффициента шероховатости нижней кромки льда, который в гидрологической практике используется при расчетах разбавления сточных вод при сбросе их в водные объекты (для разработки проекта норм НДС, а также в качестве исходных данных при моделировании гидрологических процессов (образования заторов, зажоров (Бузин, Зиновьев 2009), зимнего меженного стока и т.д.).

В проектно-изыскательской деятельности определение этого параметра сводится к использованию справочных данных, основанных на косвенных зависимостях от таких параметров, как: число дней от начала ледостава, наличие шуги, величина выступов шероховатости нижней кромки льда, средняя скорость потока в период установления ледостава, различные свойства ледяного покрова и т.д. (Бузин, 2009, гл. 2.3).

Авторами была предпринята попытка скорректировать расход воды, полученный с помощью профилографа River Surveyor M9 путем изменения коэффициентов шероховатости на каждой скоростной вертикали в программном продукте River Surveyor Stationary Live с учетом фактических измерений датчиком Посейдон-1 (рис. 3). На 15 скоростных вертикалях были детально измерены скорости течения на горизонтах от нижней кромки льда до глубины 2 м. В табл. 2 приведено падение скоростей (в % от максимальной скорости на вертикали). Несмотря на то, что на некоторых вертикалях коэффициент был увеличен в 4 раза, общий расход воды изменился всего на 0,52% (на отдельных вертикалях максимально – до 4,41%). Причиной этого является небольшая (7%) доля «слепой приледной» площади относительно общей площади сечения реки.

Таблица 2. Значение занижения скоростей течения (в % от наибольшей скорости на вертикали) по 15 скоростным вертикалям для гидроствора р.Обь – протока Вартовская

Характеристика	Глубина погружения датчика Посейдон-1 под нижнюю кромку льда				
	2 см	10 см	20 см	50 см	100 см
Среднее	76,8	42,4	36,8	27,5	21,8
Максимальное	89,8	59,0	50,9	36,5	33,0
Минимальное	45,5	25,0	21,6	22,9	6,40

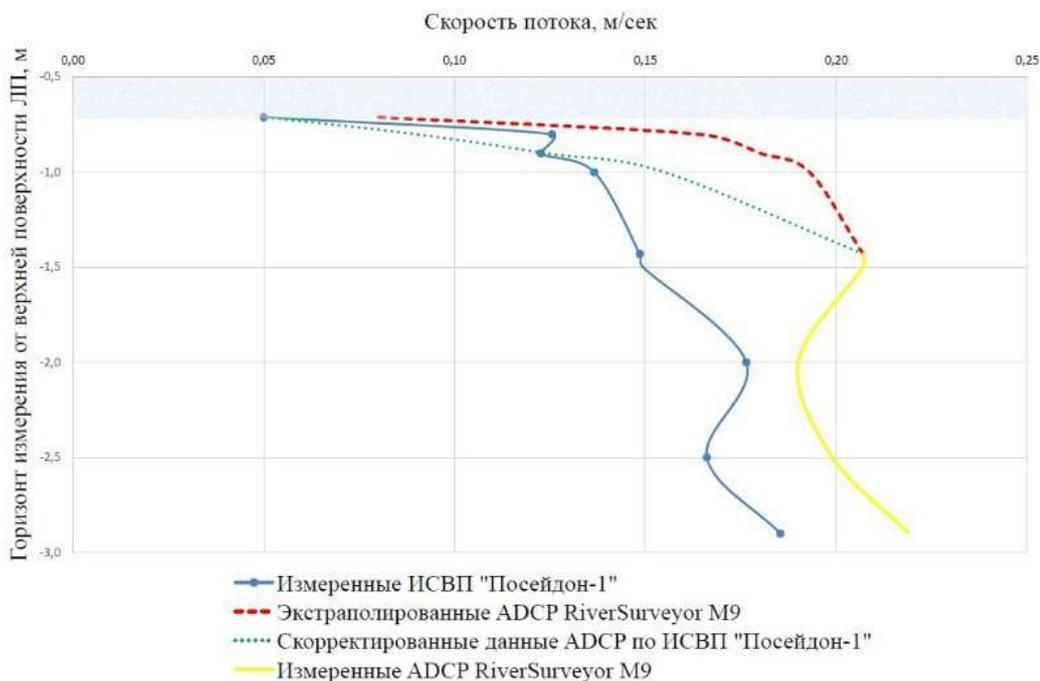


Рис. 3. Этюры скоростей течения по скоростной вертикали № 14 р. Обь-протока Вартовская

### Заключение

Электромагнитный датчик скорости водного потока Посейдон-1 показывает хорошую сходимость с результатами измерений расхода воды акустическим профилографом и гидрометрической вертушкой, имеет ряд существенных преимуществ и особенностей. Однако для его применения необходимо быть уверенным в том, что он правильно установлен в потоке при измерении, что не всегда возможно при измерении в зимний период на больших реках.

### Литература

1. Бузин В.А. Математическое моделирование в решении задач расчета и прогноза заторов льда // Метеорология и гидрология. 2009. № 2. С. 68–79.
2. Бузин В.А., Зиновьев А.Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы). Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс», 2009. 168 с.
3. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2. Гидрометеорологические наблюдения на постах. Часть II. Гидрологические наблюдения на постах // Л.: Гидрометеиздат, 1975. С.133–139.
4. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Часть I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках // Л.: Гидрометеиздат, 1978. С.131–133.
5. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 29 декабря 2020 г. № 1118 «Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей».
6. РД 52.08.163-88 Дополнение к Наставлению гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 6. Гидрологические наблюдения и работы на речных станциях и постах. Часть I. Гидрологические наблюдения и работы на больших и средних реках // Л.: Гидрометеиздат, 1989. С.12–14.
7. РД 52.08.767-2012 Расход воды на водотоках. Методика измерений акустическими доплеровскими профилографами «Stream Pro» и «Rio Grande» // Санкт-Петербург: ФГБУ «ГГИ», 2012. 63 с.

## МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СРОКОВ ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ И ВСКРЫТИЯ НА Р. ТОМИ У Г. ТОМСКА – РЕЗУЛЬТАТЫ С УЧЕТОМ ИСТОРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В XVIII И XIX СТОЛЕТИЯХ

Д.А. Вершинин, В.А. Земцов, А.С. Тарасов

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, daversh@ggf.tsu.ru*

В работе показаны многолетние изменения сроков образования ледовых явлений, замерзания и вскрытия р. Томи у г. Томска. Наблюдается статистически значимые сдвиги сроков ледообразования на более поздние даты, а сроков вскрытия – на более ранние. Также статистически значимым получается и сокращение продолжительности ледостава.

*Ключевые слова: замерзание реки, ледостав, вскрытие реки*

The work shows long-term changes in the timing of the formation of ice, freezing up and breaking up of the river Tom near the city of Tomsk. There are statistically significant shifts in the timing of ice formation to later dates, and in the timing of breakup - to earlier ones. The reduction in the duration of ice cover period is also statistically significant.

*Keywords: river ice formation, river freeze up and break up, duration of river ice cover*

Глобальное потепление климата в последнее время стало проявляться в широком круге природных процессов и, в частности, в сроках образования и разрушения ледяного покрова на реках. Исследование изменений этих сроков имеет и практический интерес для экономики, и для фундаментальной науки в связи с тем, что климатологи мало уделяют внимания климату переходных сезонов (Гинзбург, 2005).

Река Томь – крупнейший приток Оби на юго-востоке Западной Сибири, берет начало на западном склоне Абаканского хребта, протекает в Республике Хакасия, Кемеровской и Томской областях на протяжении до г. Томска 800 км. Бассейн Томи площадью 62000 км<sup>2</sup> достаточно увлажнен. Годовое количество осадков по данным наблюдений сети станций и постов Гидрометслужбы в разных частях бассейна изменяется от 350 мм до 800 мм. (Вершинина, 2018). За теплый период года (с апреля по октябрь) повсеместно выпадает до 75 %, в холодный (ноябрь–март) – до 25 % годового количества осадков.

Томь – река с алтайским типом водного режима, который характеризуется растянутым, до 3–4 месяцев, весенне-летним половодьем и низкой продолжительной зимней меженью (Беркович и др. 2015). Первые ледовые образования в виде заберегов и сала появляются в конце октября – первых числах ноября вслед за переходом температуры воздуха через 0 °С к отрицательным значениям. В нижнем течении Томи ледостав в среднем наблюдается в первой половине ноября. Средняя продолжительность периода с ледовыми явлениями в низовьях Томи составляет 180 дней. Вскрытие реки происходит под влиянием сочетания динамических и тепловых факторов. В верховьях Томь вскрывается раньше, и волна половодья вскрывает на своем пути вниз по течению разные по протяженности участки реки. При этом на плесах, поворотах и разветвлениях русла лед скапливается, образуя заторы. В среднем, начало ледохода приходится в Томске на третью декаду апреля.

Изменения климата оказали определенное воздействие на ледовый режим Томи. В целом река начала вскрываться раньше, а замерзать позже. Подробнее рассмотрим это утверждение на основе анализа многолетних наблюдений за датами появления первых ледовых явлений, установления ледостава, вскрытия ледового покрова и продолжительностью ледовых явлений на реке Томь в г. Томске.

Первые наблюдения за осенним замерзанием реки опубликованы в разделе о метеорологических наблюдениях в газете «Томские Губернские ведомости», издававшейся в 1857–1917 гг. С 1893 г. начал действовать гидрологический пост в с.Белобородово ниже Томска, а с 1918 г. – и в г. Томске (Томск-пристань). Согласно указанным источникам, даты замерзания Томи в Томске меняются с 7–10 ноября в 1865–1887 гг. в среднем до 13 ноября в последние два десятилетия.

Даты появления первых ледовых явлений, которые можно достоверно оценить лишь по данным наблюдений на посту Томск-пристань, меняются в течение 127-летнего периода неоднозначно. С начала наблюдений до первого десятилетия XX века эти даты сдвигаются с 2–4 ноября к 20-м числам октября, затем идет обратный сдвиг к 5–7 ноября в 1920–1930 гг. и снова переход на более ранние даты – 25–27 октября в начале 1960-х годов. Далее происходит сдвиг дат появления первых ледовых явлений на 5–7 ноября к концу второго десятилетия нынешнего столетия (рис. 1). Подобным образом изменяются и среднемесячные температуры воздуха в октябре – коэффициент корреляции с датой появления ледовых явлений 0,62. Линейный тренд изменения дат является статистически значимым при уровне значимости 5 %. По сравнению с рекомендованной ВМО нормой для условий современного климата (1961–1990 гг.) в последние три десятилетия ледовые явления на Томи стали появляться в среднем на шесть суток позднее.

Также статистически значимым при уровне 5 % является положительный линейный тренд дат установления ледостава за период с 1893 г. по настоящее время. В среднем сроки установления ледостава сместились с 3–4 на 12–13 ноября. Смещение дат установления ледостава за последние два 30-летних периода состави-

ло пять суток. Связь со среднемесячной температурой октября несколько хуже – коэффициент корреляции 0,54. Судя по всему, необходимо также учитывать влияние механического фактора на замерзание, например, водность реки в это время, а также температуру воздуха выше по течению реки и на водосборе.

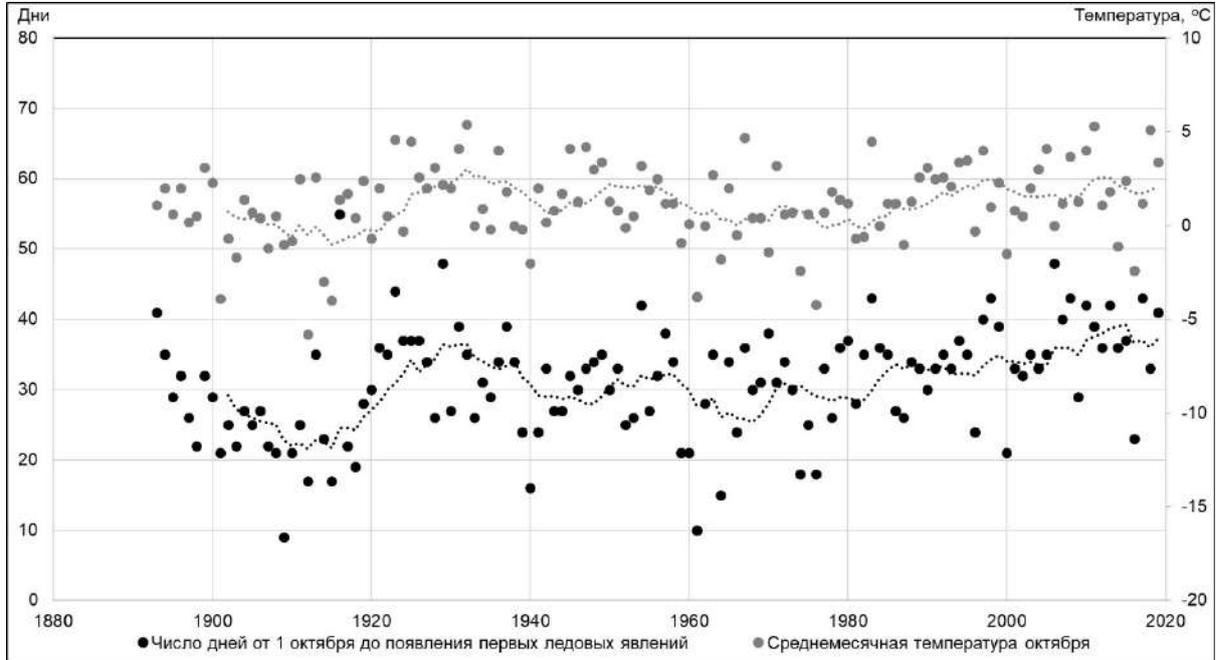


Рис. 1. Многолетняя изменчивость сроков ледообразования и среднемесячной температуры воздуха в октябре в г. Томске.

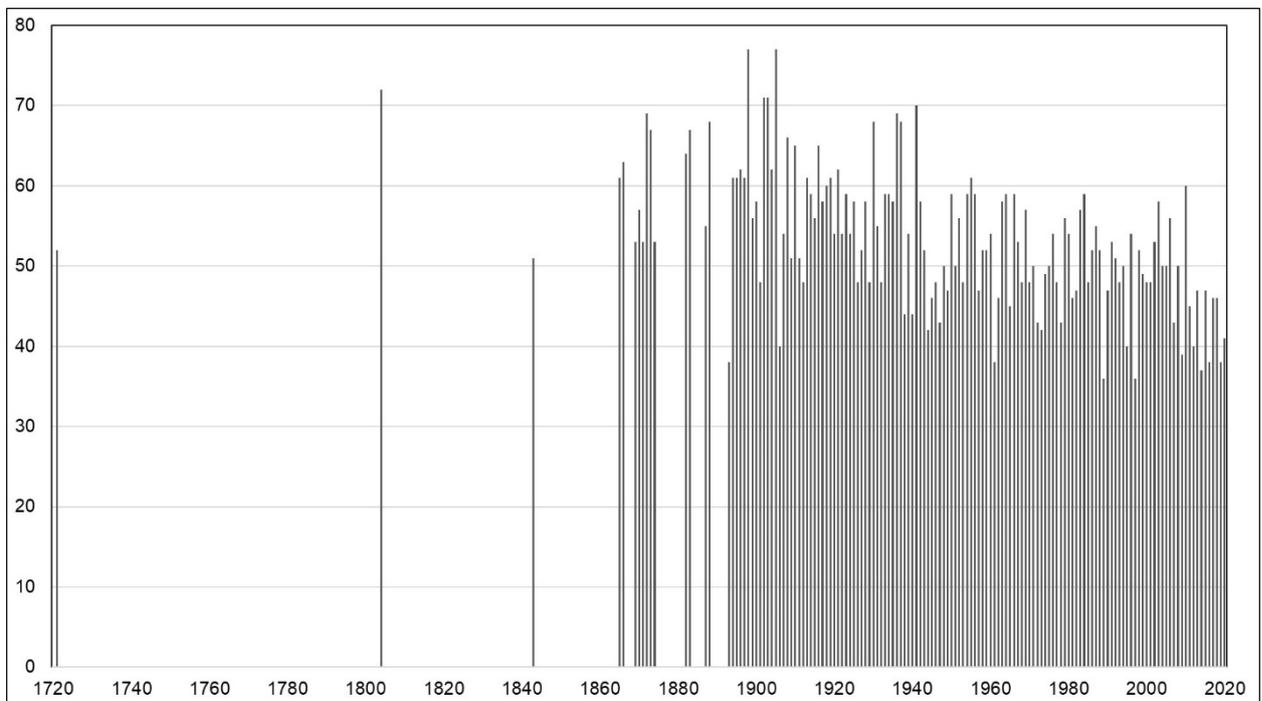


Рис. 2. Многолетние изменения числа дней от 1 марта до начала ледохода на р. Томь в г. Томске

Первые из известных данные о вскрытии р. Томи в г. Томске описаны в дневниках Д.Г. Мессершмидта (Дневники..., 1962), который во время своего путешествия по Сибири три месяца в 1721 г. находился в Томске и описывал природные явления, флору окрестностей Томска, историю, этнографию и географию края (Евсеева, 2001). Согласно его записям, первые подвижки льда произошли 21 апреля. На следующий день, 22 апреля, лед остановился и образовал затор, в результате которого уровень воды поднялся на 7,0 – 10,6 м, 23 апреля затор был прорван и образовались навалы льда, а 27 апреля 1721 г. уровень воды вновь поднялся и навалы льда пришли в движение.

Далее сведения о сроках вскрытия можно обнаружить в описаниях больших наводнений, которые, согласно (Зайков, 1954), происходили в 1804 и 1843 гг. С 1865 г. появляются первые сведения о вскрытии Томи в «Томских Губернских ведомостях», а с 1888 г. сведения об осенне-весенних ледовых явлениях начинают собирать Г.К. Тюменцев – заведующий и наблюдатель Томской метеорологической станции (Марусенко, 1958).

Для анализа наличия тренда в изменении дат вскрытия взят период с начала непрерывных наблюдений за ледовыми явлениями – с 1893 г. Отрицательный линейный тренд дат вскрытия также является статистически значимым при уровне 5 %. Опять же сравнивая сроки вскрытия в 1961–1990 гг. с аналогичным по продолжительности периодом 1991–2020 гг., получаем смещение дат вскрытия на трое суток на более ранние сроки, а за последнее десятилетие – на восемь суток. На рис. 2 приведены многолетние изменения числа дней от 1 марта до начала ледохода с начала появления первых сведений о ледоходе на Томи.

Продолжительность ледостава в целом сократилась со 178 суток на рубеже XIX–XX вв. до 154 суток в XXI в., т.е. на 24 дня, в среднем уменьшаясь на двое суток за 10 лет. Сравнивая с изолиниями на карте продолжительности ледостава, составленной по данным наблюдений до 1967 г. (Ресурсы, 1972), где средняя продолжительность ледостава определяется в 166

суток, получаем интенсивность сокращения периода ледостава также двое суток за 10 лет. Относительно периода 1961–1990 гг., когда продолжительность ледостава составляла в среднем 164 суток, в 1991–2020 гг. произошло сокращение до 155 суток.

Таким образом, наблюдается общий сдвиг дат начала ледообразования на более поздние сроки, а разрушения ледового покрова – на более ранние и, как следствие, сокращение периода ледостава и увеличение продолжительности периода открытого русла на р. Томи у г. Томска.

### Литература

1. Беркович К.М., Вершинин Д.А., Земцов В.А., Рулева С.Н., Сурков В.В., Фролова Н.Л. Ледовый и русловой режим нижнего течения реки Томи / Эрозионные и русловые процессы. Сборник трудов // под ред. Р.С. Чалова. М.: Географический факультет МГУ. 2015. Выпуск 6. С. 183–198.
2. Вершинина И.П. Геоэкологические условия формирования стока и прогнозы характеристик весеннего половодья реки Томи у города Томска : дисс. канд. геогр. наук. Томск, 2018. 220 с.
3. Гинзбург Б.М. Сроки замерзания и вскрытия рек в конце XX века и возможные их изменения в XXI веке // Метеорология и гидрология. 2005 № 12. С. 88–97.
4. Евсеева Н.С. География Томской области. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. 223 с.
5. Зайков Б.Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. Л., 1954. 138 с.
6. Марусенко Я.И. Ледовый режим рек бассейна Томи. Томск: Изд-во Томского Университета, 1958. 174 с.
7. Мессершмидт Д.Г. Экспедиция в Сибирь 1720–1727. Т. 1: Дневники 1721–1722. / Берлин, 1962. 380 с. (На нем. яз.)
8. Ресурсы поверхностных вод СССР. Алтай и Западная Сибирь / под ред. Н.А. Паниной. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. Т.15. Вып. 2. 408 с.

## ВЛИЯНИЕ СНЕЖНЫХ ЛАВИН НА РЕКРЕАЦИОННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХИБИН

М.А. Викулина, А.С. Турчанинова

*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, masanna2003@mail.ru*

Хибины – один из самых динамично развивающихся туристических регионов Арктики имеет высокую степень лавинной активности. Начиная с 2000х годов здесь практически ежегодно гибнут туристы в лавинах. Проведенная оценка лавинного риска позволила сделать вывод, что расчетные показатели в Хибинах выросли в 7 раз за последнее десятилетие. Динамика лавинного риска демонстрирует, что при развитии в регионе туризма необходимо учитывать существование лавинной угрозы и принимать соответствующие меры.

*Ключевые слова: лавины, Хибины, Арктика, лавинная опасность, лавинный риск, рекреация*

The Khibiny is one of the most dynamically developing tourist regions of the Arctic. The Khibiny mountains have a high degree of avalanche activity. Since the 2000s, tourists have been killed in avalanches almost every year. The assessment of avalanche risk made it possible to conclude that the estimated indicators in the Khibiny have increased by 7 times over the past decade. It is necessary to regulate the level of avalanche risk for developing tourism in the region.

*Keywords: snow avalanche, Khibiny mountains, Arctic, avalanche hazard, avalanche risk, recreation*

Хибины – один из стремительно растущих туристических центров не только Мурманской области, а всего Северо-Западного региона. Несмотря на ограниченную площадь, Хибины имеют большой рекреационный потенциал (Евсеев и др., 1996; Воробьевская, Седова, 2008). Привлекательность территории обуславливают следующие факторы: компактность территории, возможность совмещения нескольких видов рекреационной деятельности, близость к индустриальным и культурным центрам России, развитая транспортная и основная инфраструктура региона. Уникальные природные условия с относительно теплой зимой и продолжительным залеганием снежного покрова позволяют заниматься зимними видами спорта и отдыха 8 месяцев – с октября по май. За последнее десятилетие туристический поток в Хибины вырос в 3–4 раза и на данный момент составляет 65000–75000 человек за зимний сезон с максимумом в марте. На небольшой территории развиты активные зимние виды спорта, такие как: горные лыжи, внетрассовое катание, беговые лыжи, снегоходный туризм, альпинизм, зимние походы на лыжах по горам, поездки на собачьих упряжках, параглайдинг (рис. 1). Хибины являются одним из центров внетрассового катания, где работают специализированные школы.

Хибины невелики по площади и высоте (максимально до 1200 м), но в то же время многие районы здесь имеют высокую лавинную активность. Частая повторяемость метелей, повышенная снежность, продолжительный лавиноактивный период приводят к тому, что лавины являются существенной угрозой, как туристической инфраструктуре, так и туристам (рис.2). Также этому способствует значительная крутизна верхних частей лавиносборов, которая в среднем составляет 35–50 градусов.

Зоны зарождения снежных лавин занимают около 15% площади Хибин и около 25% площади склонов.

Лавинная деятельность в Хибинах может проявляться на площади 437 км<sup>2</sup>, что составляет около 40% всего горного массива. Густота лавинных очагов на большей части территории Хибин составляет не более 4 на 1 км дна долины. Наибольшая густота лавинных очагов наблюдается в ущелье Кукисвумчорр в центре Хибин и стенках цирков, где количество лавинных очагов может достигать 12 на 1 погонный километр (Викулина, 2012). Большинство лавин сходит со склонов крутизной 30–45°, но также и со склонов крутизной 25–30°. Наиболее распространенными типами лавиносборов являются денудационные воронки и осовные склоны. Особый класс лавиносборов составляют техногенные формы рельефа, связанные с ведением горных работ.

В большинстве лавиносборов Хибин лавины сходят ежегодно, а во многих лавиносборах количество лавин достигает 6 и более в год. Максимальной повторяемостью обладают лавиносборы, которые находятся в стенках цирков и имеют достаточно крутые верхние части лавинных очагов. В целом повторяемость лавин выше в тех лавиносборах, которые больше врезаны, имеют размер лавинного очага не более 2 га и имеют крутизну лавинного очага выше 35°. Таким характеристикам соответствуют эрозионные врезы и небольшие по площади денудационные воронки. Средняя повторяемость лавин в Хибинах оценена как 1,6–1,7 лавин в год. Лавины в течение зимнего сезона сходят неравномерно с максимумом в марте месяце, который имеет наибольшую туристическую нагрузку (рис. 3). В Хибинах около 70% естественных лавин сходит во время снегопадов, обычно сопровождаемых метелями, а около 30% приходится на период оттепелей, которые начинаются в начале или середине апреля (рис. 4).

Катастрофические события, связанные с лавинами, случаются в Хибинах практически ежегодно начиная с начала 2000х годов за счет увеличения турпотока и развития новых туристических направлений. Последние

два десятилетия повысилась доля жертв от лавин среди любителей фрирайда, а кроме того после 2010 г. появилась новая категория пострадавших от лавин - водители

снегоходов. Количество жертв среди туристов за последние два десятилетия составляет 28 человек (табл. 1). За тоже время в лавинах погибли двое местных жителей.

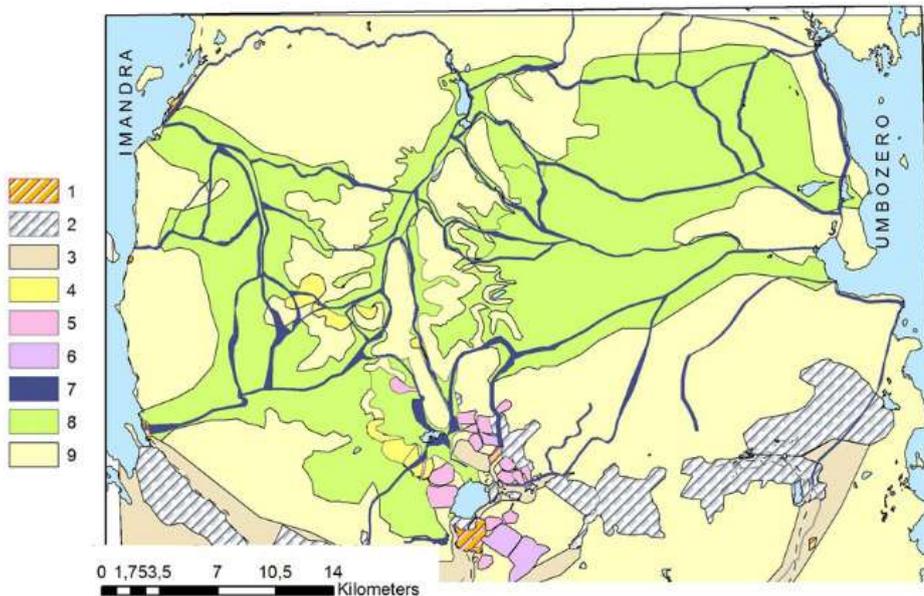


Рис.1. Рекреационное использование Хибин.

1 – городская застройка; 2 – промышленные зоны; 3 – дороги; 4 – районы занятия альпинизмом; 5 – зоны внетрассового катания; 6 – горнолыжные курорты; 7 – маршруты для лыжных походов; 8 – районы катания на снегоходах; 9 – редко используемые территории.



Рис.2. Лавина, сошедшая 26 марта 2006 года, в которой погиб фрирайдер из Эстонии (Фото М.А. Викулина)

Таблица 1. Количество жертв от лавин в Хибинах для разных туристических направлений (2000–2021гг.)

Туристическое направление	Количество погибших
Альпинизм	6
Лыжные походы	5
Внетрассовые спуски	7
Снегоходное катание	7
Горнолыжные центры	3

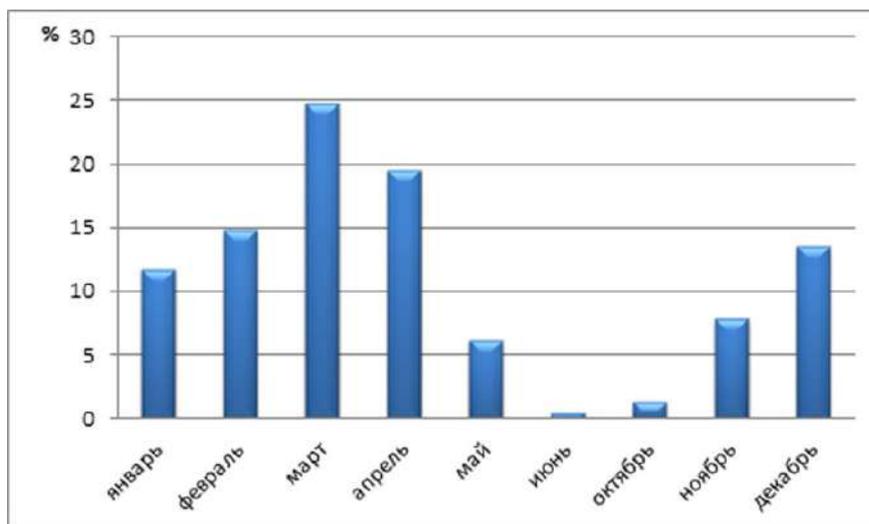


Рис.3. Распределение (%) снежных лавин в денудационных воронках Хибин по месяцам.

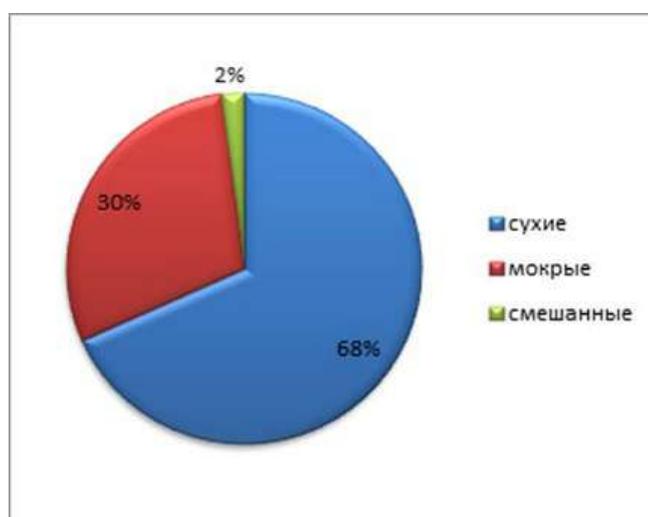


Рис.4. Распределение снежных лавин на примере лавиносбора №13 (г. Юкспорр) в зависимости от состояния снежного покрова.

Оценка социального лавинного риска (возможное ежегодное количество погибших) была проведена в Хибинах в 2008 и 2019 годах с использованием методики, основанной на сочетании параметров лавинной активности и социально-экономических параметров, характеризующих уязвимость человека по отношению к лавинам в пространстве и во времени (Shnyuparkov et al., 2012). Проведенная оценка позволила сделать вывод, что расчетные показатели лавинного риска в Хибинах выросли в 7 раз за последнее десятилетие. Это подтверждается и статистическими данными. Произведенная оценка лавинного риска показывает, что в связи с изменением использования горной территории за 10 лет, изменились и показатели лавинного риска за счет увеличения числа туристов, появления и развития новых туристических направлений.

Высокие значения лавинного риска характерны для территорий развития горнолыжного спорта. Практически все существующие горнолыжные комплексы Хибин могут подвергаться воздействию лавин. Мно-

гие горнолыжные трассы и сооружения строились без учета лавинной опасности. Например, горнолыжный комплекс на западном склоне г. Айкуайвенчорр, расположенный в черте города Кировска, трассы которого могут поражаться снежными лавинами.

Участки лавиносборов, в которых происходит внетрассовое катание, также характеризуются повышенными значениями риска. На увеличение степени безопасности в этом направлении повлиять трудно, так как люди осознанно или неосознанно идут на этот риск. Поэтому смертность от таких событий в Хибинах будет только расти.

Количество катастрофических событий, связанных с лавинами, на данный момент достаточно велико для такой ограниченной территории и приближается к показателям на момент начала освоения гор. Динамика лавинного риска ясно демонстрирует, что при развитии в регионе туризма необходимо учитывать существование лавинной угрозы и принимать соответствующие меры.

Управление и снижение показателей социального риска от природных опасных явлений было и остается актуальной проблемой. В Хибинах – самом освоенном горном регионе российской Арктики, первоочередной задачей является уменьшение лавинного риска и предотвращение неблагоприятных событий, связанных со сходом лавин.

### Литература

1. Викулина М.А. Оценка лавинной активности, опасности и риска Хибин в среднем масштабе // Материалы гляциологических исследований. 2012. №1. С. 57–62.
2. Воробьевская Е.Л., Седова Н.Б. Особенности

зимнего рекреационного природопользования в Хибинах // Вестн. Моск. Ун-та. Сер.5. География. 2008. №6. С. 18–24.

3. Евсеев А.В., Красовская Т.М., Мироненко Н.С., Тикунов В.С., Шабалина Н.В. Оценка рекреационного потенциала Севера России. Смоленск: Смоленский гос. ун-т., 1996. 62 с.
4. Shnyuparkov A.L., Fuchs S., Sokratov S.A., Koltermann K.P., Seliverstov Yu G., Vikulina M.A. Theory and practice of individual snow avalanche risk assessment in the Russian Arctic // GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. V. 5, № 3, 2012, pp. 64–81.

УДК 556

## ЛЕДОВЫЙ РЕЖИМ ВЕРХНЕЙ ЛЕНЫ

Н.И. Горошкова, Д.А. Семенова, А.В. Стриженок

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия,  
goroshnat@yandex.ru, darya.dsa@yandex.ru, anastasiastrizenok@mail.ru

В статье представлен ледовый режим верхней Лены: особенности формирования ледяного покрова, образование зажоров, анализ максимальных толщин льда в рассматриваемых створах, также особое внимание уделено процессу вскрытия реки, нередко сопровождающегося заторами льда.

*Ключевые слова:* ледовый режим, начало ледовых явлений, замерзание, зажоры, толщина льда, начало ледохода, заторы.

The article focuses on the ice regime on the Lena River: features of ice cover formation, jamming, analysis of maximum ice thickness and special attention is paid to the river opening process, which is often accompanied by ice jams.

*Keywords:* ice regime, beginning of ice phenomena, freezing, jamming, ice thickness, beginning of ice drift, jams.

**Замерзание.** Продолжительность замерзания (от появления ледяных образований до установления сплошного ледяного покрова) на р. Лена на участке от р.п Жигалово до г. Киренска, который составляет 650 км, колеблется от 17 до 21 дня.

Даты установления сплошного ледяного покрова в верхнем течении Лены приходятся на начало ноября, а на участке с. Змеиново – с. Витим на середину ноября (11– 15 ноября). Раньше всего замерзают места сужения русла, где задерживается лед, и неглубокие протоки. Поэтому в начале замерзания чередуются участки, со льдом различной структуры и толщины, с участками свободными ото льда – полыньями. Продолжительность существования последних невелика – несколько дней, и только в местах выхода в русло подземных вод они держатся довольно долго, до наступления сильных морозов.

При раннем наступлении зимы ледостав образуется на 15–20 дней раньше средних многолетних значений, а в годы с теплой осенью – до 20 дней позднее (Ресурсы..., 1972).

Для рек верховий Лены свойственно зажорообразование, особенно при длинных, теплых осенних периодах. При этом происходит краткосрочное повышение уровня воды разной высоты как на одном и том же участ-

ке реки в разные годы, так и по длине реки. Скопление шуги подо льдом обнаруживается при измерении расходов воды на гидростворе. Иногда площадь, занятая шугой в поперечнике гидроствора может существенно превышать площадь свободного водного сечения.

**Ледяной покров.** На начальном этапе характер и толщина ледяного покрова на реках бассейна верхней Лены зависят от особенностей их замерзания. Из-за различного времени замерзания отдельных участков, неоднородности ледового материала (шуга или кристаллический лед) толщина льда по длине реки может существенно различаться.

Наращение толщины льда в течение зимы зависит от гидрометеорологических условий, главным образом от температуры воздуха, толщины и плотности снега на поверхности льда, выходов подземных вод в русло реки, уклона русла на конкретном участке и количества осадков. До января происходит наиболее интенсивное увеличение толщины льда, в марте оно существенно снижается, а в апреле, достигнув максимальных значений, начинает уменьшаться.

Максимальных значений толщина льда обычно достигает в марте-апреле (таблица 1). Отклонения от этих сроков могут быть связаны с местными услови-

ями, например, с наличием на данном речном участке гидротехнических сооружений, например, речного порта в г. Усть-Куте или выпусков сточных вод.

**Наледи.** На реках бассейна Верхней Лены наблюдается наледи, в образовании которых могут участво-

вать поверхностные (речные), надмерзлотные, поступающие со склонов долин, и подмерзлотные воды. В.Р. Алексеев (Условия..., 1969) считает, что собственно речные наледи могут формироваться только в областях, где отсутствуют многолетнемерзлые породы.

Таблица 1. Максимальная толщина льда за период наблюдений, см.

№ п/п	Река - Пункт	Максимальная толщина льда за период наблюдений, см					
		1945-1980 гг.		1978-1988 гг.		2008-2018 гг.	
1	Лена - Жигалово	144	28.02.63	99	25.02,05.03.1985	84	31.03,10.04.2011
2	Лена - Грузновка	100	20.04.57	78	15.03.1988	61	31.03.2008
3	Лена – Усть-Кут	129	20,25.01.53	98	10.02.78	92	10.03,10.04.2010
4	Лена-Подымахино	104	15,20.03.53	78	10,25.04.80	81	10.04.2011
5	Лена – Макарово (1971-80 гг.)	91	20.03.80	91	31.03.82, 20.03.80	94	30.03,20.04.2008
6	Лена - Киренск	127	20.03.53	89	25.03,05.04.1980	96	31.01,10.02.2010
7	Лена - Змеинова	140	20.04.48	94	10.04.85	89	31.03.2010

Наледи представляют собой опасное природное явление, оказывающее вредное, часто разрушающее воздействие на инженерные сооружения. Наибольший вред наледи причиняют автомобильным и железным дорогам, газопроводам и нефтепроводам. Нередки случаи, когда на наледных участках почти ежегодно приходится перестраивать мосты, менять водопропускные сооружения, осуществлять капитальный ремонт дорожного покрытия и пр. Большой вред наледи приносят гидротехническим сооружениям, промышленным и гражданским зданиям, санитарно-техническим коммуникациям и т. п. Необходимость защиты инженерных сооружений от воздействия наледей и наледных процессов приводит к большим затратам средств, материалов, техники и рабочего времени (Марков и др., 2016).

Нарастание льда под влиянием наледи достигает 20 и более см. По данным наблюдений в створе р. Лена – р.п. Жигалово за период 10–20.12.1952 г. толщина льда

увеличилась на 29 см. Наледи отмечаются и в створе р. Лена – р. п. Качуг. Наледи, сформированные в русле реки, размываются весенними паводковыми водами и исчезают во время ледохода.

Вскрытие. Река Лена вскрывается на подъеме волны весеннего половодья, которая формируется во время снеготаяния, а иногда и сопровождающих этот процесс дождей осадков. При продвижении вниз по течению эта волна взламывает ледяной покров, далее начинается ледоход или формируется затор льда.

На рассматриваемом участке река Лена вскрывается в начале - середине мая. При ранних веснах дата вскрытия перемещается на конец апреля, при поздних – на конец мая. Самое раннее вскрытие рек верхней части бассейна Лена наблюдалось в 1938 году.

Средние даты начала ледохода до начала активного потепления и за 2008–2018 гг. приведены в таблице 2. Средняя продолжительность вскрытия 8–12 дней, а продолжительность непосредственно ледохода 4–6 дней.

Таблица 2. Осредненные даты начала ледохода на реке Лена.

Пункт	Период наблюдений	Дата	Период наблюдений	Дата
р. Лена – г. Усть-Кут	1914-1988	05.05	2008-2018	26.04
р. Лена – с. Подымахино	1920-1988	06.05	2008-2018	28.04
р. Лена – с. Макарово	1970-1988	06.05	2008-2018	30.04
р. Лена –с. Змеинов	1936-1988	7.05	2008-2018	30.04

**Заторы.** Одной из характерных особенностей процесса вскрытия р. Лены являются возникающие в это время заторы льда, обуславливающие высокие подъемы уровней воды, в некоторые годы это и максимальные годовые уровни.

В таблице 3 представлены данные о максимальных

заторных уровнях воды за периоды с начала наблюдений по 1988 год и за 2008–2018 гг.

Несмотря на происходящее изменение климата, в период с 2008 по 2018 год заторы на участке р. Лена от г. Усть-Кут до с. Змеиново продолжают наблюдаться (табл. 3).

Таблица 3. Значения максимальных заторных уровней воды, см над «0» поста, БС

№ п/п	Река - Пункт	Максимальный заторный уровень воды за период наблюдений, см над «0» поста			
		1912–1988 гг.		2008–2018 гг.	
Отметка «0» поста 408,82 см, БС					
1	Лена – Жигалово	413	1.05.1964	306	3.05-4.05.2010
Отметка «0» поста 385,28 см, БС					
2	Лена – Грузновка	461	16.04.1945	Пост закрыт после 2008 г.	
Отметка «0» поста 281,47 см, БС					
3	Лена – Усть-Кут	795	22.05.1979	307	16.04.2014
Отметка «0» поста 273,27 см, БС					
4	Лена-Подымахино	862	21.05.24	518	6.05.2010
Отметка «0» поста 252,05 см, БС					
5	Лена – Макарово (дейст.с 1969)	985	12.05.1983	945	10.05.2010
Отметка «0» поста 249,38 см, БС					
6	Лена – Киренск	794	10.05.1915	-	-
Отметка «0» поста 245,25 см, БС					
7	Лена – Змеинова	846	24.05.1979	503	8.05.2008

При этом их максимальные значения близки к многолетним. Особенно часто они формируются в створе с. Макарово. За рассматриваемый период они отмечены здесь в 2008-2010 и 2015, 2018 годах, при этом, за исключением 2009 г., им соответствовали максимальные годовые уровни. Продолжительность существования заторов невелика: 1-4 дня. Максимальный за период 1969-2018 гг. уровень воды 985 см над «0» поста наблюдался 12.05.1983 г. и был заторным. Затор продолжался 4 дня, после его прорыва отмечены навалы льда на берегах. Большая частота формирования заторов у села Макарово, обусловлена тем, что ниже по течению река делает резкий поворот, на котором задерживается движение льда, что способствует образованию затора. При угрозе затопления населенного пункта, заторы разрушаются с помощью взрывов сотрудниками МЧС.

**Вывод.** Изменение климата отразилось на всех характеристиках ледовых явлений в бассейне р. Лены, но характер их изменений не однозначный, их значения могут увеличиваться и уменьшаться. Как показывают результаты исследований (Горошкова, Лобанов, 2019), наиболее существенно изменилась продолжительность ледостава – она уменьшилась. Однако сроки начала и окончания периода открытого русла, прак-

тически остались прежними. Это связано с увеличением процесса замерзания – более продолжительными осенними явлениями – заберегами, шугоходами и осенними ледоходами.

При общей тенденции уменьшения толщины ледяного покрова, как средних, так и максимальных величин, значимый тренд в их хронологическом ходе не наблюдается.

#### Литература

1. Ресурсы поверхностных вод. Том 17. Лено-Индигирский район. Л.: Гидрометеоздат.: 1972. С. 347–365.
2. Условия формирования и распространения наледей на юге Якутии. В кн. : «Налеги Сибири»(под редакцией О.Н. Толтихина, В.М. Пигузовой, М.: «Наука» 1969, С. 31–41.
3. Марков М.Л., Василенко Н.Г., Гуревич Е.В. М26 Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2016. 320 с.
4. Горошкова Н.И., Лобанов В.А. Характеристики ледового режима рек Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 55, С. 86–98

## ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ЭВОЛЮЦИЯ ГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ ГОРНОГО УЗЛА ЦАМБАГАРАВ (МОНГОЛЬСКИЙ АЛТАЙ)

Д. Отгонбаяр<sup>1\*</sup>, Б. Батсүрэн<sup>2</sup>, Ц. Билгүүн<sup>2</sup>, М. Баярмаа<sup>1</sup>, Ж. Золбаяр<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ховдский государственный университет, Ховд, Монголия

<sup>2</sup>Монгольский Государственный университет, Улан-Батор, Монголия

\**icescore\_ot@yahoo.com*

В Монгольском Алтае, как в других горных районах мира, наблюдается множество процессов, индуцированных изменением климата. Одним из таких процессов является “прорыв ледникового озера” (ПЛО). В работе, на основе данных дистанционного зондирования, дана краткая информация о наблюдаемом ПЛО, который произошел 27 июня 2021 года в горном узле Цамбагарав в бассейне р. Битуу-эргийн гол.

*Ключевые слова: Прорыв ледникового озера (ПЛО), Монгольский Алтай, изменение климата.*

In the Mongolian Altai, as in other mountainous regions of the world, there are many impacts associated with climate change, one of them is the “glacial lake outburst” (GLO). In the work, based on the remote sensing method, a brief information is considered about the GLO phenomenon, which took place on June 27, 2021 in the Tsambagarav mountain cluster in the basin of the river Bituu-Ergiin gol.

*Keywords: Glacier lake outburst, Mongolian Altai, Climate change.*

Опасные природные явления, связанные с деградацией ледников и многолетней мерзлоты, распространены в большинстве горных районов Земли. Данные явления несут угрозу жизням людей, их местобитанию, а также устойчивому развитию территорий. В связи с быстро приходящим глобальным потеплением и связанными с ним процессами в уязвимой горной криосфере происходит эволюция ландшафтов, и, как следствие, возникают новые угрозы.

На сегодняшний день главным вызовом, связанным с предупреждением и оценкой опасных явлений в высокогорных районах, где присутствует оледенение, является фундаментальное изменение парадигмы, производимое последствиями продолжающегося глобального потепления. Исчезновение ледников, деградация многолетней мерзлоты, эволюция ландшафтов и соответствующие изменения во взаимосвязанных поверхностных процессах представляют собой совокупные явления. Одно из них – это прорывы ледниковых озер.

Термин “прорыв ледникового озера” (ПЛО) используется для обозначения катастрофического сброса воды из водоёма, образовавшегося рядом, перед, под или на леднике. Дамбы, запруживающие водоём, могут быть сложены преимущественно из льда, моренных отложений или коренных пород (GARHAZ, 2017).

Как и современное, позднеледниковое оледенение Монгольского Алтая носило очаговый характер, располагалось на максимально поднятых хребтах, но, вследствие более низкого положения в прошлом снеговой границы, охватывало значительно большую площадь.

Наиболее обширный очаг древнего оледенения располагается в горном узле Табын-богдо, хребтах Пограничном, Цэнгэл-хайрхан, Душин, Мунххайрхан

и др. Менее крупные и относительно изолированные очаги оледенения существовали на хребтах Цаган-шибету, Цамбагарав, Дэлун, Батар-хайрхан, Сутай, Хархиринский массив и др. (Отгонбаяр, 2012).

Горный узел Цамбагарав приурочен к Центральной части Монгольского Алтая, в пределах 90°04'91" в.д и 48°04'01" с.ш. Ледниковый узел Цамбагарав по площади современного оледенения находится на втором месте после узла Табын-богдо. Здесь сосредоточена значительная часть современного оледенения Монгольского Алтая. По нашим данным, оно составляет 73,18 км<sup>2</sup> (2008 г). Известно 40 ледников разного морфологического типа (Отгонбаяр, 2013). Территория расположена (по административному делению) между сомоном Эрдэнэбурэн Ховдского аймака и сомоном Баяннур, Алтанцугц Баян-Улгэйского аймака.

Горный узел Цамбагарав состоит из трех массивов: Цаст-Уул, Хух-Нуруу-Уул, Ямаг-Уул. Абсолютные высоты в пределах горного узла Цамбагарав изменяются от 2840 м до 4193 м. Сорок ледников сосредоточены в нивально-ледниковом поясе горного узла Цамбагарав. Региональные климатические условия и особенности строения гряды определили пространственное распределение (до 40% каменных ледников приурочены к склонам Северной и Северо-восточной экспозиций) и морфологические типы ледников (долинный, карово-долинный, каровый, висячие и плосковершинные ледники).

Наиболее распространенным типом рельефа Монгольского Алтая являются озерные котловины. В массиве Цамбагарав множество озер ледникового генезиса с площадью менее 0,1 км<sup>2</sup>. Например, озера Хангийн-нур, Дээд-нур, Доод-нур, Хух-нур, Ногоон нур, Яматын нур Нурганы нур и др.

В поясе недавней дегляциации хребта Цамбагарав отмечалось появление и увеличение площади акватории 8 ледниковых озер (рис. 1). Подавляющее большинство озер, образовавшихся в течение пятидесяти лет, находились вблизи концов ледниковых языков (моренно-подпрудное озеро и озеро межморенных

впадин) и ледниково-аккумулятивных комплексов Малого ледникового периода (термокарстовые озера). С помощью геоинформационного анализа полихронных пространственных данных выявлены периоды повышенной активности ледникового и термокарстового лимногенеза (1992–1998, 2012–2016 гг.).

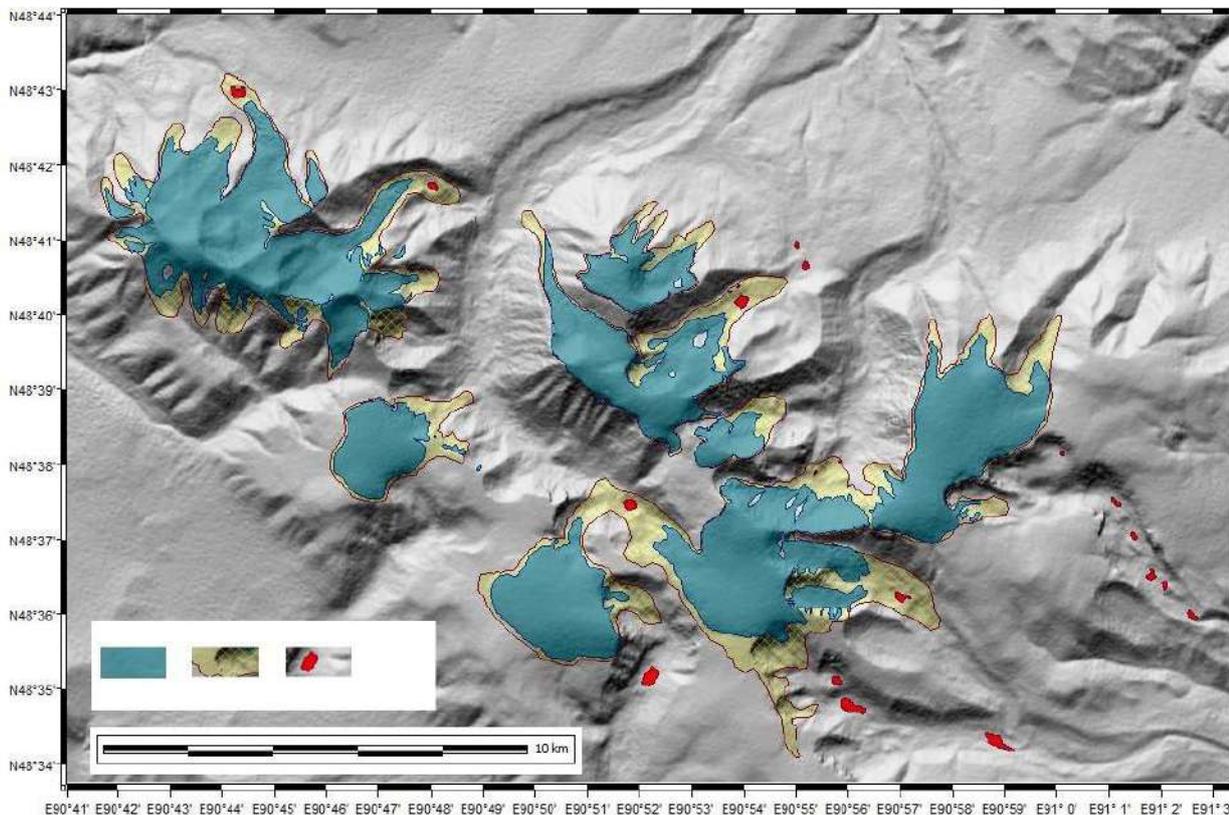


Рис. 1. Пространственное распределение ледниковых озер в горном узле Цамбагарав.

1 – положение ледников в 2017 г., 2 – зона дегляциации во время малого ледникового периода, 3 – ледниковые озера (Final report., 2019)

Наводнения, вызванные прорывом ледниковых озер, неоднократно становились причиной стихийных бедствий в различных высокогорных регионах мира. Относительно быстрое отступление ледников в Горном Алтае и образование ледниковых озер в недавнем прошлом увеличили риск прорыва ледниковых озер в России и Монголии. 27 июля 2021 года на хребте Хухнуру уул произошел прорыв ледниковых озер в бассейне реки Битүү-эргийн гол (рис. 2).

Мощный водный поток, ширина которого достигла примерно 20 м, высота 30–35 м, а длина 40–45 км, тек на юг и впадал в реку Ховд. Причиненный ущерб от этого стихийного бедствия составил: уничтожено 10 га тополевых, облепиховых и ивовых рощ, поврежден 20-тонный деревянный мост, уничтожено 18 весенних и осенних жилищ и стоянок местных жителей, нанесен урон мелким грызунам.

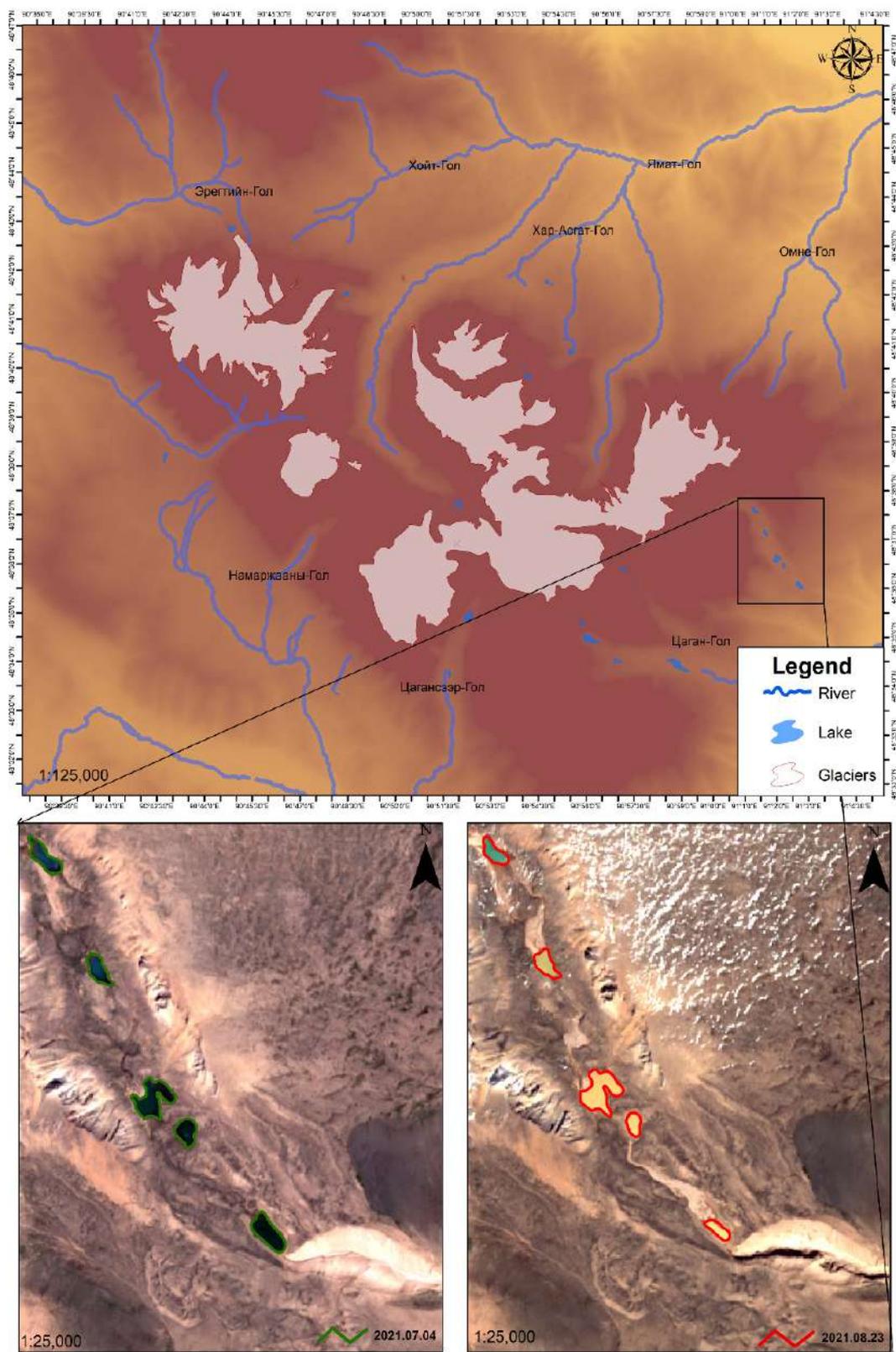
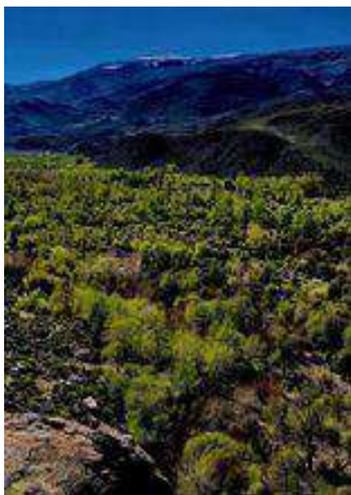


Рис.2. Прорыв ледниковых озер в горном узле Цамбагарав. Фото до и после прорыва



*Рис 3. Общий виды долин р. Битүү-Эргийн гол до и после прорыва ледниковых озер  
Фото. У. Цэрэнтогтох 2019, 2021 гг.*

В долине р. Битүү-Эргийн гол до сих пор продолжается сход оползней. Необходимы дальнейшие подробные исследования прорывов ледниковых озер для усиления мониторинга за другими ледниковыми озерами в высокогорных районах Монгольского Алтая и для предотвращения стихийных бедствий.

#### **Литература**

1. GARNAZ 2017: Оценка опасных явлений, связанных с ледниками и мерзлотой, в горных районах – Технический руководящий документ. Подготовлен: Аллен, С., Фрей, Х., Хуггел, К. и др. Постоянная группа по вопросам ледников и многолетней мерзлоты (GARNAZ) Международной ассоциации

криосферных наук (IACS) и Международной ассоциации по мерзлотоведению (IPA). Цюрих, Швейцария/Лима, Перу, 72 с.

2. Отгонбаяр Д. Водно-ледниковые ресурсы бессточных районов Западной Монголии: современная оценка и тенденции изменения. Диссертации канд. геогр. наук, Томск-Барнаул. 2012
3. Отгонбаяр Д. Современное оледенение Монгольского Алтая (на примере хребтов Мунххайрхан, Сутай, горного узла Цамбагарав). Барнаул: Бизнес Коннект. 2013. 156с.
4. Report «Project Final Report: CRRP2017-05MY-Demberel» <https://www.apn-gcr.org/publication/project-final-report-crrp2017-05my-demberel/>

## БЛОУАУТИНГ-ГИДРОВУЛКАНИЗМ КАК ЯВЛЕНИЕ ФИНАЛЬНОЙ ФАЗЫ ДЕГРАДАЦИИ ПАЛЕОКРИОСФЕРЫ («ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ») В ВАСЮГАНСКИХ И ПИНСКИХ БОЛОТАХ

В.А. Епифанов

АО «СНИИГГиМС», АО «Росгеология», Новосибирск, Россия, zet864@yandex.ru

Проведено сопоставление двух крупнейших Евразийских болотных систем и показаны признаки проявления в их пределах двух типов литозлеватации – существенно водного гидровулканизма и газо-водного фонтанирования с выносом больших объемов породной пульпы (блоуаутинга). Отмечена связь Васюганских и Пинских болот с краевыми частями нефтегазоносных рифт-рамповых систем и их неотектонической активностью. Показано, что формирование «вечной мерзлоты» обусловлено напорной глубинной дегазацией, а деградация связана с распадом образовавшихся в ВМ залежей метангидратов.

*Ключевые слова:* болотные системы, литозлеватация, блоуаутинг, неотектоника

A comparison of the two largest Eurasian bog systems is carried out and signs of the manifestation of two types of lithoelevation within them are shown - essentially water hydrovolcanism and gas-water flowing with the removal of large volumes of rock pulp (blowout). The relationship of the Vasyugan and Pinsk bogs with the marginal parts of the oil and gas rift-ramp systems and their neotectonic activity is noted. It is shown that the formation of "permafrost" is caused by pressure deep degassing, and degradation is associated with the decay of methane hydrate deposits formed in the VM.

*Keywords:* swamp systems, lithoelevation, blowout, neotectonics

Исследования Квартера позволили специалистам выделить до 6 «ледниковых эпох», и иногда в верхних горизонтах осадочного чехла выделять по несколько криогенных горизонтов. Было отмечено, что резкое похолодание климата при начале гляциоэпох часто предварялось образованием «вечной мерзлоты» (Макаренко, 1997, Епифанов, 2003).

И уже давно было доказано расчетами, что образование криосферы в том виде и объеме «вечной мерзлоты» (ВМ) в которых она сейчас наблюдается, может быть внятно объяснено только подтоком к земной поверхности напорных газов (Бгатов, Ларгин 1990, Бгатов, 1993, Епифанов, 2015 в). Причиной дегазации является, в том числе, аконсервация глубинных месторождений углеводородов (УВ), на что прямо указывают факты: «аномальные мощности мерзлых толщ над газовой залежью наблюдаются в таких как Медвежья, Заполярная, Юбилейная, Русская. Увеличение мощности мерзлых пород над их сводами составляет соответственно 130–140, 100–230, 220–230 и 80–100 м по сравнению с окружающими пространствами» (Бембель и др., 1997, с. 196).

Дегазация залежей инициируется тектоническими нагрузками и литологическим «старением» перекрывающих глинистых пород с образованием в них трещиноватости.

В результате этого, в породных толщах над месторождениями УВ с аномально высоким давлением пласта (АВДП) создаются условия для активной рассеянной миграции газов. В обстановках струйной напорной дегазации по принципу дросселя начинает «работать» эффект Джоуля–Томсона, и, за счет адиабатического расширения находящихся под высоким давлением газов, происходит охлаждение вмещающего геопроцесса.

Такой эффект «дросселя» используется в домашних холодильных установках и любой любопытный мерзлотовед вполне сможет понять и оценить этот механизм образования ВМ наслаждаясь охлажденными напитками в летнюю жару и не завися от погоды.

Горизонты и линзы воды тоже попадают в микроструйно-миграционную зону и охлаждаются. Вода обладает свойством растворять в себе газы и эта её способность по мере охлаждения возрастает. И в итоге, в замкнутом пространстве в обстановках высокого литостатического давления вода перенасыщается газом и образуются клатратные соединения, называемые газогидратами. Газогидраты или газовые клатраты – кристаллические нестабильные структуры, в которых газ находится в окружении молекул воды и удерживается вместе с ними низкой температурой и высоким давлением. Если газом насыщения был метан, то образуются метангидраты (МГ).

Естественно, что многие месторождения УВ газов могут и, по мнению автора, должны были сопровождаться приповерхностными залежами МГ.

Международным энергетическим агентством в 2009 году указывалось, что запасы традиционного природного газа в мире достигают почти 470 трлн. м<sup>3</sup>, но общие ресурсы газогидратов могут превышать их до 10 раз, составляя от 1 000 до 5 000 трлн. м<sup>3</sup>. И сейчас уже известно более 220 месторождений газогидратов. Они располагаются на шельфе Северного Ледовитого океана и в Охотском море, вблизи океанических берегов США, Канады, Мексики, Японии, Южной Кореи, Индии и Китая и др., а также во внутренних морях – Средиземном, Черном, Каспийском и на дне озера Байкал. На суше в России залежи газогидратов были обнаружены на Чукотке, в Колымско-Индибирской низменности, на Сибирской платформе – в районе кимберлитовой трубки «Удачная»

и в устье р. Оленек, а также на газовых месторождениях Ямбургское, Бованенковское, Уренгойское, Мессояхское (Епифанов, 2018 а,б).

Очевидно, что реликтовые газогидраты распространены гораздо более широко, чем это пока известно, и, по мнению автора, должны быть распространены над купольной частью, и по периферии многих других месторождений УВ. Сложность обнаружения МГ связана с тем, что при существующих технологиях бурения они разрушаются еще во время проходки скважины и продуктивные горизонты не распознаются, ибо для существования метангидратов при атмосферном давлении необходима температура ниже  $-80^{\circ}\text{C}$ .

Клатратные соединения очень неустойчивы и жестко зависят от P-T параметров среды, и при  $0^{\circ}\text{C}$  требуется давление не менее 25 бар. Залежи МГ на дне арктических морей распространены на глубинах 200 м и более, а на суше встречаются только в ВМ. Учитывая, что газогидраты обладают эффектом самоконсервации, заключающимся в образовании при снижении давления пленки льда прекращающей разложение МГ при достижении ею «критической толщины», то залежи их могут в виде реликтовых залежать практически по всему интервалу мерзлых пород (Епифанов, 2015 б).

При разрушении  $1\text{ м}^3$  метангидрата в среднем образуются около  $164\text{ м}^3$  метана в газовой фазе и около  $0,87\text{ м}^3$  воды. Лёгкий газ уходит и иногда создаёт «сухие» высоконапорные близповерхностные залежи, способные к самопроизвольным выбросам и образованию взрывных воронок, быстро заполняющихся талой водой.

Таким способом в Российской арктической «мокрой» тундре происходило образование многочис-

ленных мелких округлых озёр, часто сливающихся в крупные бесформенные. Эти процессы нами подробно рассматривались и представлялись на профильных научных совещаниях и конференциях (Епифанов, 2015 а,б,в, 2018 а,б,в). Докладывались они и в Томском государственном университете на научно-практической конференции, организованной к 100-летию открытия естественного отделения (Епифанов, 2017).

Высвободившаяся при разрушении МГ вода ведёт себя по-разному. Может замерзать в ВМ в виде пластов, жил, линз и куполов пресного льда. А может формировать вертикальные обводненные талики и подпитывать водой озёра образованные газовыми выбросами. Именно такие озера-истоки в настоящее время составляют подавляющую часть северных тундровых «мокрых» ландшафтов России.

Отмеченные выше связи можно, например, увидеть на космическом снимке района Уренгойского газового месторождения, которое сопровождают залежи МГ (см. выше), частично уже разрушенные и превратившиеся в обширные заозёрные участки (рис. 1).

Нефтегазоносность Западно-Сибирской плиты обусловлена эволюцией крупной рифт-рамповой системы, испытавшей активность в раннем триасе во время формирования линейного грабен-структурного Хатангско-Западносибирского комплекса. Южная периферия этой системы и связанные с ней месторождения УВ пространственно совпадают с южной частью Васюганских болот, что, в силу изложенных выше фактов, предполагает существование системных генетические связей между ними.

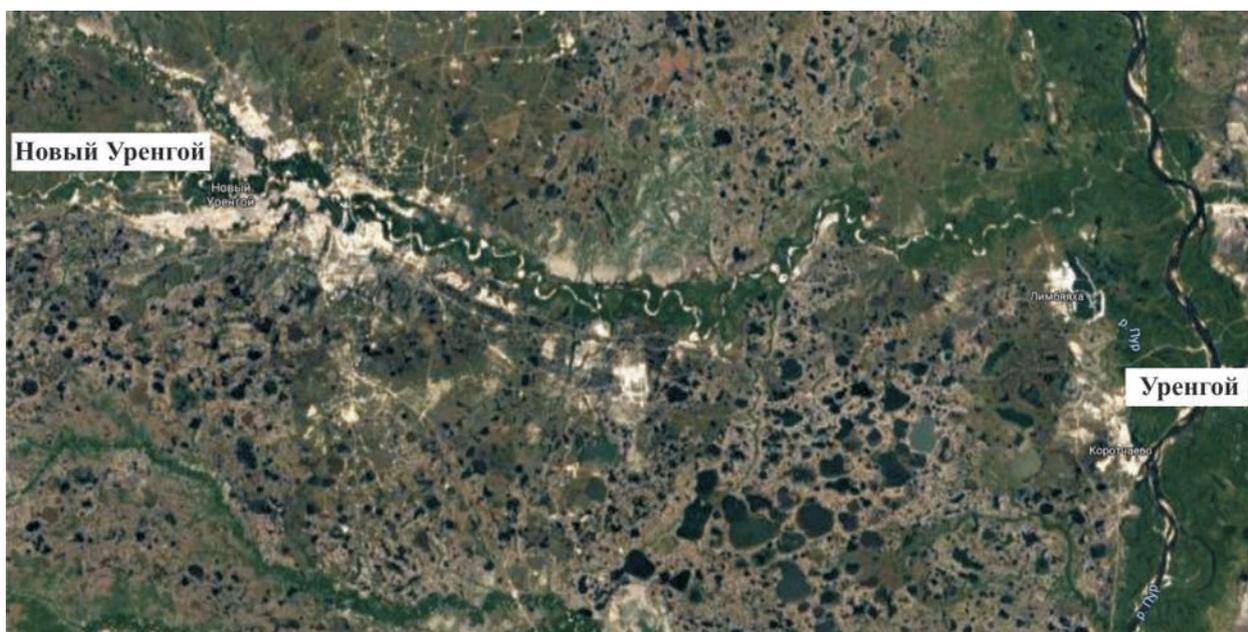


Рис. 1. Вид Уренгойских газовых месторождений и заозёрная «мокрая тундра»

Возникновение в Западной Сибири уникальных Васюганских болот в северной части Обь-Иртышского междуречья на возвышенной равнине древней лесостепи связывают с началом голоцена. При этом, еще 500 лет назад в начале «Малого Ледникового периода» площадь Васюганья была на 75% меньше современной. Единный ныне массив ранее состоял из 19 болот, изначально сгруппированных в 3-х районах (Епифанов, 2015 а).

Ныне актуально учитывать, что Васюганские болота оказывают весьма благоприятное влияние на региональный климат, являясь крупнейшим источником пресных вод с обширной поверхностью испарения, и играют основную роль в формировании местного положительного углерод-кислородного баланса приземной атмосферы. В торфяниках погребены и не выделяют  $\text{CO}_2$  гигантские объёмы неразложившихся органических остатков, а местами развиты здесь обширные массивы южной тайги и разнообразная болотная растительность продуцируют 1,5–4 млн тонн кислорода в год (Епифанов, 2018).

Площадь объединившихся болот достигает 54 тыс  $\text{km}^2$  и включает в себя около 800 тысяч мелких озёр из которых вытекают десятки больших и малых рек. Основная часть территории Васюганья в настоящее время испытывает поднятие и одновременно с этим

подтопление глубинными водами. Объяснить такое сочетание природных процессов можно лишь отжимом к земной поверхности водных масс, сохранившихся после распада и дегазации залежей МГ, сопровождавших многочисленные месторождения УВ. А также таянием остаточных подземных льдов при отступлении зоны ВМ к северу.

Роль напорных глубинных вод в формировании болот может оказаться определяющей на всех этапах образования и эволюции Васюганской системы. На проявление здесь блоуаутинга-гидровулканизма указывает обилие каплевидных округлых форм размером до 1-2 км, ясно выраженных в ландшафте южной части болот в 25 км к югу от группы мелких месторождений УВ (рис. 2 а). Овалы из покрытого растительностью «намывного грунта» располагаются среди топей и безлесных марей и ориентированы к долине р. Тартас своим тонким концом (Епифанов, 2015, 2017). Подобные грунтовые острова на юге Васюганья нередки. По их виду можно полагать, что чёткость форм определена временем образования. Так, например, расположенные в 75 км к северу от оз. Убинское и узким концом стока направленные к долине р. Омь (тоже правый приток р. Иртыш), разновеликие «капельки» (рис. 2 б) свидетельствуют о недавнем времени их образования.



Рис. 2. Каплевидные формы выноса породной пульпы и направления стока вод

Очевидно, что эти разномасштабные формы указывают на точно локализованный напорный газово-водный вынос из недр на поверхность глубинного глинисто-песчаного материала, явившегося субстратом для древесно-кустарниковой растительности, а сток «излишков» водных масс к базисам эрозии зафиксирован направлениями «хвостиков».

Возможно, современная история и динамика формирования системы Васюганских болот отражают один из финальных этапов последовательной деградации плейстоценовой ВМ, признаки бывшего существования которой в виде круглых озёр распространены и на южных территориях Обь-Иртышского междуречья – в Барабинской лесостепи.

Как и Васюганье, образование Пинских болот Белоруси связывают с началом голоцена. Но сейчас ВМ

здесь нет, ибо на средневековых картах (тоже связь с «Малым Ледниковым периодом») и в древних документах указывается, что прежде на месте болот находилось гигантское озеро, на северном побережье которого располагалась «древняя Литва», на юге – Волынь, а Пинск был портовым, возможно, островным городом. Часть пути «из варяг в греки» могла проходить по озеру. Об этом свидетельствуют находки корабельных якорей на заболоченных водоразделах. До проведения работ по мелиорации застойные болота выделяли «газовые миазмы», по нашему мнению – метан распавшихся МГ, и местное население было слабосильным. Но во второй половине XX века ~ 30 000  $\text{km}^2$  болот осушили сетью каналов и сплошные торфяники стали сельхозугодьями (Епифанов, 2020).

Мощность торфа местами здесь достигает 6 м. Под

ним залегают существенно кварцевые пески, иногда содержащие в нижних слоях «валуны гранитоидов». Эти факты «классически» расцениваются как несомненное свидетельство «ледникового разноса-привноса» приползавшими неоднократно из Скандинавии ледниками или их языками.

Однако, уже сама минералогия песков прямо указывает на невозможность ледникового накопления подстилающих торфяники осадков, поскольку в рамках любых климатических парадигм существенно кварцевый состав они могут приобрести только в условиях тропиков-субтропиков при химическом выветривании содержащихся в песчаниках полевых шпатов. А вполне очевидно, что в «ледниковые» эпохи теплого климата здесь существовать просто не могло. Избирательный же перенос ледниками «из Скандинавии» песков именно кварцевого состава – явление доселе никому пока еще не известное.

Вместе с тем, вне «ледниковой парадигмы» этот факт вполне объясняет геология.

Сингенезис солей и гидротермального кварца с элизионными водами в обстановках относительно низких температур при процессах щелочно-кремниевой флюидизации в зонах катагенеза был детально рассмотрен в статьях и в объеме монографии (Иванкин, Назарова, 1993, 2001). Подобные условия возникают в рифт-рамповых системах, а при оживлении этих авлакогенов происходит отжимание газообразных, жидких и пластичных веществ кверху – в область низких давлений у земной поверхности.

Данные геологии также свидетельствуют о том, что в пределах Пинских болот, расположенных в Припятском прогибе на западе Донецко-Днепровско-Припятского (ДДП) авлакогена, в осадочном чехле залегают девонские соленосные толщи. Контур площади их распространения на юге ограничен верховьями правых притоков р. Припяти и тянется к северу до Солегорска, а с запада на восток протягивается от Пинска до Мозыря, где тоже ведется соледобыча. Как и в других частях ДДП, здесь тоже установлены небольшие (относительно сибирских) месторождения и самостоятельные залежи УВ.

В Пинских болотах по фототону растительного покрова в лесных массивах и даже на распаханых полях вблизи мелиоративных каналов, по космоснимкам Google нередко уверенно выделяются многочисленные «теневые формы» мелких и средних по размерам округлых палеоозёр – каналов давнего гидровулканизма-блоуаутинга.

На западной периферии соленосной площади на юге Беларуси среди Пинских болот подстилающихся кварцевыми песчаниками располагается множество крупных озер, часть из которых имеет выраженную округлую форму (рис. 3 а,б).

Круглое озеро диаметром ~ 1,4 км (рис. 3 а) располагается около д. Повитье в 85 км к запад-юго-западу от Пинска (52.016831; 24.801637). Южнее и западнее него встречается множество разновеликих, но в основном мелких озер, в том числе и округлых. У малых озер песчаной светлой окантовки не наблюдается.

Круглое озеро диаметром ~ 1,8 км (рис. 3 б) находится севернее д. Тышковичи (52.409505; 25.592857) в 45 км к северо-западу от Пинска. В этой части болот видна эффективность мелиорации и попавшие в поле снимка «теневые формы» округлых озер, иногда полностью заросших, мы оконтурили точками.

И на восточном окончании соленосной площади, в 30–35 км от месторождений Речица на Днепре, тоже находится идеально круглое озеро с отчетливо выраженным песчаным валом (рис. 4 а). Это озеро располагается в зоне Тикичско-Гомельской глубинных разломов поперечных ДДП авлакогену. С ней связаны не только месторождения УВ, но и активная заозеренность левобережной части Днепра (рис. 5) на протяженном участке «от Чернигова до Канева». Идеально круглое озеро по песчаному валу имеющее диаметр ~ 1,7 км (52.180090; 30.181323) расположено в 25 км к югу от Гомеля и в 80 км севернее Чернигова «на стрелке впадения» реки Сож в Днепр. Приозерный песчаный ландшафт (рис. 4 б) напоминает автору песчаные участки оазиса «Дьяковского палеогидровулкана».

Отмечаемое для Пинских болот обилие округлых озер, нередко имеющих песчаные валы-оторочки, сочетается с изобилием кварцевых песков четвертичного возраста, подстилающих современные торфяники.

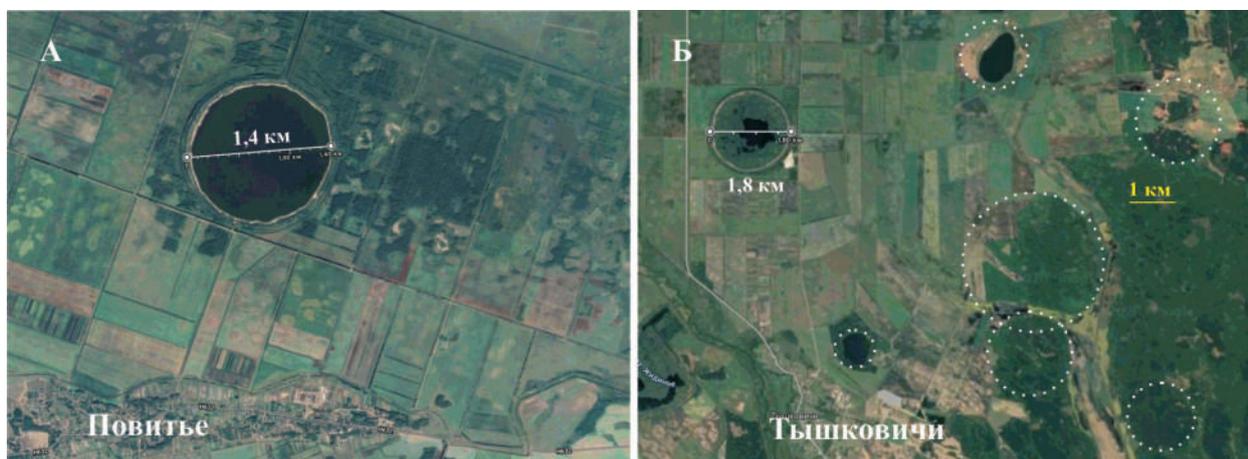


Рис. 3. Круглые озера Пинских болот в соленосной части впадины Припятского авлакогена. А и Б – озера западной периферии площади погребенных девонских солей

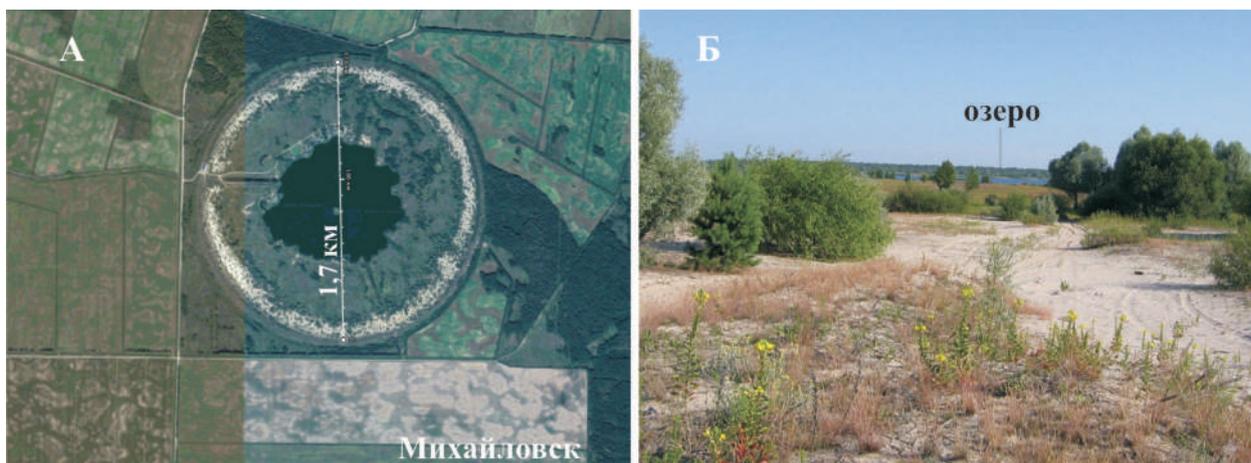


Рис. 4. А – вид озера «Путеводная Звезда» (Google); Б – песчаный ландшафт окружающего озеро вала со стороны Михайловска (фото Интернет, Михайловск)



Рис. 5. Озёра на границе Черниговской области с Киевской в месте «движения Днепровского ледового языка»

А пространственная сопряженность озёр и песков с хорошо карстующимися погребенными соленосными и сульфатными отложениями, наряду с близостью к месторождениям УВ, в совокупности позволяет уверенно предполагать здесь наличие древних гидровулканов. Очевидно, что при перепадах давления водные потоки, неся с собой глубинные кварцевые пески, вращались и вытачивали в породах круглые каналы-колотцы, становившиеся озёрами. Остаточная же дегазация МГ приводила к фонтанированию (блоуаутингу) и образованию из песка валов.

Отметим, что самыми «гиблыми» местами Пинских болот считаются зарастающие озёра, их называют «чёртовы дыры» и объясняют связью с подземным карстом. Дренаж гидровулканов Баскунчак и Дьяковка тоже связан с карстующимися «сульфатными рубашками» соляных диапиров, в основном гипсового состава (Епифанов, 2019 а).

Итак, в пределах Пинских болот, расположенных в краевой зоне на западной периферии ДДП, на границе чехла и фундамента могли осуществляться процессы глубинной флюидной генерации К-На солей, кварцевых песков, воды и газов (Иванкин, Назарова, 1993, 2001). В неотектонический этап соляной диапиризм активизировался, а флюидная система переходила в высоконапорное состояние и находящиеся под высоким давлением газ и вода разгружались по дренажным системам карстующихся диапиров на дневную поверхность, вынося большой объём песчано-кварцевой пульпы. По сравнению с водными излияниями гидровулканов, при блоуаутинге транспортирующая сила потоков жидкой песчаной пульпы явно выше, что позволяет нам именно с этим типом процессов связать и разнос «валунов гранитоидов» по занятой ныне болотами территории.

Выносу же к дневной поверхности гранитоидов и сланцев фундамента соляными диапирами и их сульф-

фатными «шляпами и рубашками» посвящен на этой Конференции отдельный наш доклад по процессам литоэлевации.

Таким образом, обе рассмотренные крупнейшие болотные системы:

1 – квазисинхронны по времени образования и глобальной перестройки систем;

2 – подобны в тектонической позиции, так как связаны с краевыми частями рифт-рамповых региональных нефте-газоносных систем, тяготея к их периферийным зонам;

3 – обладают поверхностными формами микро- и мезорельефа, свидетельствующими о массовом и активном проявлении напорных процессов гидровулканизма и блоуаутинга, которые могут быть прямо связаны с деградацией «вечной мерзлоты», образующейся в результате глубинной УВ-дегазации.

### Литература

1. Бгатов В.И., Ларгин А.Ф. Происхождение многолетнемерзлых пород // Сов. геология. 1990. № 8. С. 102–108.
2. Бгатов В.И. Подходы к экогеологии (Жизнь и геологическая среда). Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. 222 с.
3. Бембель Р.М., Бембель С.Р., Кашин А.Е., Ласковец Е.Б. Связь очагов активности нефтегазонакопления и глубинных криогенных источников // Матер. междунар. конф.: Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение РАН, 1997. С. 193–199.
4. Епифанов В.А. Дегазация недр и развитие оледенений в связи с вращением Земли // Матер. науч. конф.: Проблемы геологии и географии Сибири. Т. IV. Томск: Изд-во ТГУ, 2003. С. 44–47.
5. Епифанов В.А. Дегазационная гипотеза возникновения глобальных оледенений // Вопросы географии Сибири: Сборник статей. Томск: ТГУ, 2006. Вып. 26. С. 81–90.
6. Епифанов В.А. «Blowout fluid» как возможная причина формирования алмазоносных россыпей // Матер. XIV Междунар. совещ.: Россыпи и месторождения кор выветривания: современные проблемы исследования и освоения. Новосибирск: Изд-во ООО «Апельсин», 2010. С. 234–239.
7. Епифанов В.А. Эволюция озерно-болотных систем и модуляции климата как результат дегазации недр // Матер. IX Всерос. совещ. по изучению четвертичного периода: Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Иркутск, 2015 а. С. 155–157.
8. Епифанов В.А. Образование газогидратов в криолитосфере, деградация залежей и некоторые формы ее проявления // Матер. 2-ой науч.-практ. конф.: Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири. Т.2. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2015 б. С. 41–43.
9. Епифанов В.А. Козволюционная модель формирования и деградации криолитосферы и скоплений газа // Матер. 2-ой науч.-практ. конф.: Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири. Т. 2. – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2015 в. С. 43–45.
10. Епифанов В.А. Самопроизвольная природная дегазация недр как явление перспективное для фундаментальных и прикладных геологических, геоморфологических, гидрологических, метеорологических и экологических исследований // Матер. IV Всерос. научн.-практ. конф. с междунар. участием (к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете): Современные проблемы географии и геологии. Томск: Томский государственный университет, 2017. Т. 2. С. 76–80.
11. Епифанов В.А. Моделирование процессов преобразования ландшафтов при разрушении залежей газогидратов // Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология». Москва, 2018 а. – <http://oilgasjournal.ru>
12. Епифанов В.А. Взрывные деформации поверхности криолитосферы в связи с космо-земными циклами эволюции геосферы // Труды Международной конференции «Дегазация Земли: геология и экология». – Москва, 2018 б. – <http://oilgasjournal.ru>
13. Епифанов В.А. Гидровулканизм соляных диапиров. Признаки существования и следы проявления // Матер. XI Всерос. совещ. по изучению четвертичного периода: Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Краснодар, 2020. в печати.
14. Иванкин П.Ф., Назарова Н.И. Природа кварцевых песчаников – коллекторов нефтебитумов // Отечественная геология, 1993. № 3. С. 78–83.
15. Иванкин П.Ф., Назарова Н.И. Глубинная флюидизация земной коры и ее роль в петрорудогенезе, соли- и нефтеобразовании. М.: ЦНИГРИ, 2001. 206 с.
16. Макаренко Г.Ф. Периодичность базальтов, биокризисы, структурная симметрия Земли. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 1997. 96 с.

## МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ РАСХОДОВ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ И РАСХОДОВ ВОДЫ В ВЕРХНЕМ ТЕЧЕНИИ БАССЕЙНА Р. ОБЬ.

Я.А. Замараева, Д.А. Вершинин

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия,  
yaroslava5515@yandex.ru, daversh@ggf.tsu.ru*

Произведена оценка многолетнего изменения среднемесячных расходов наносов и расходов воды по Верхней Оби. Исследования проводились по 8 гидрологическим постам. Наблюдения за расходами наносов проводились с начала наблюдений по настоящее время. Оценка значимости тренда определялась по следующим методам: оценка значимости тренда по коэффициенту парной корреляции и параметру линейного уравнения регрессии. В половине рядов наблюдения прослеживается снижение среднемесячных расходов взвешенных наносов. На реке Иня у с. Березовка наблюдается увеличение среднемесячных расходов взвешенных наносов. В 20% случаев на р. Обь, как и на ее притоках, наблюдаются значимые тренды. Рост трендов наблюдается меньше, чем у половины оцениваемых рядов. На Оби наблюдается увеличение трендов среднемесячных расходов воды.

*Ключевые слова: взвешенные наносы, оценка тренда, Верхнее течение р. Обь .*

An assessment of the long-term change in the average monthly sediment and water consumption along the Upper Ob was made. The research was carried out at 8 hydrological posts. Observations of sediment expenditure have been carried out from the beginning of observations to the present. The assessment of the significance of the trend was determined by the following methods: assessment of the significance of the trend by the coefficient of pair correlation and the parameter of the linear regression equation. In half of the observation series, there is a decrease in the average monthly expenditure of suspended sediments. On the Inya River in the village of Berezovka, an increase in the average monthly expenditure of suspended sediment is observed. In 20% of cases, significant trends are observed on the Ob River, as well as on its tributaries. Trend growth is observed in less than half of the estimated series. On the Ob, there is an increase in the trends of average monthly water consumption.

*Keywords: suspended sediments, trend estimation, Upper course of the Ob River.*

Эрозия почв – это исследования, которые привлекают внимание ученых на протяжении многих десятилетий. В последнее время это стало относительно серьезной Мировой экологической проблемой (Lal, R., et al., 2010). Эрозия почвы, вызванная добычей полезных ископаемых, является важной частью общей эрозии почвы в ведущих горнодобывающих странах (Carroll, C. et al., 2016).

Многие процессы в бассейнах и устьях рек, а также на морском побережье, связаны с формированием и перемещением речных наносов. Сток наносов определяет характер русловых процессов, существование неустойчивых русел и катастрофические изменения русловой сети в речных бассейнах, формирование и облик дельт, динамику их гидрографической сети морского края, вероятность наводнений (Алексеевский Н.И., 1998, Михайлов В.Н., 1998).

Влияют речные наносы и на использование водных ресурсов, воздействуя на занесение водозаборов и судовых ходов, определяя стоимость водоподготовки, затраты на очистку гидротехнических объектов и др. Часть загрязняющих веществ перемещается с речными наносами. Обычно больше всего наносов реки переносят во взвешенном состоянии. (Магрицкий Д.В., 2010).

Изменения стока наносов в результате естественного и антропогенного воздействия влекут за собой серьезные экологические последствия. В результате многочисленных исследований установлено, что хозяйственная деятельность, усиливая увеличение или

уменьшение стока наносов рек, тем самым нарушает их естественный режим (Лю Шугуань, Чалов и др., 2001, Дедков, Мозжерин, 2000, Фатуллаев, 2002).

Мутность воды на реках России формируется в результате сочетания физико-географических факторов, связанных с особенностями развития эрозионных процессов на водосборе и в речном потоке. Соотношение характера рельефа, типа растительности и климатических особенностей определяют интенсивность поступления минеральных частиц с поверхности речного бассейна.

На локальных участках рек антропогенное воздействие приводит к увеличению мутности в связи с изменением условий поступления минеральных частиц с водосборов и при сбросе сточных вод (Промахова, 2016).

Ранние исследования авторов подтверждают, что на Оби и большинстве ее крупных притоков в Томской области, наблюдается снижение годового стока взвешенных наносов (Мельникова и др., 2018) и снижение среднемесячных расходов взвешенных наносов на реке Обь за период открытого русла (Мельникова, Вершинин, 2018).

В статье представлены результаты исследования многолетних изменений среднемесячных расходов взвешенных наносов, расходов воды Верхнего течения Оби и ее крупных притоков за период открытого русла, включающий весенне-летнее половодье и летне-осеннюю межень.

### Объекты и методы исследования

Река Обь берет свое начало в горах Алтая и образуется при слиянии рек Бия и Катунь. Площадь водосбора реки составляет 2 990 000 км<sup>2</sup>, длина реки 3650 км. Река протекает по пяти регионам, пересекая Западно-Сибирскую равнину с юга на север. Протяженность Верхней и Средней Оби 1820 км. На всем протяжении реки в нее впадают крупные притоки, такие как Томь, Чулым, Чая, Кеть, Парабель, Васюган, Тым, Чарыш, Алей, Чумыш, Иня, Кондома. Обь является второй рекой бассейна Северного ледовитого океана по объему выносимого стока взвешенных наносов (Магрицкий Д.В., 2010).

Для исследования многолетних изменений среднемесячных расходов взвешенных наносов, расходов воды Верхней Оби были выбраны гидрологические посты, приведенные в таблице 1.

По водному режиму р. Обь относится к Западно-Сибирскому типу, с весенне-летним половодьем, формирующимся за счет стока талых вод. Снеговой сток составляет 75% от годового, дождевой около 15%, грунтовый – 10%. Бассейны рек имеют слабо выраженную границу и, как правило, грушевидную форму. Долины рек трапециевидной формы. Склоны покрыты лесом, поймы – заболочены и заросли кустарником. Русла рек извилистые.

Реки Обского бассейна имеют длительное весенне-летнее половодье. Подъем уровня весной происходит чаще в середине – конце апреля. Ранний подъем бывает в конце марта, а поздний – в начале мая.

### Результаты и обсуждение

Крупные реки России в целом характеризуются невысокими значениями мутности воды и стока взвешенных наносов (Тананаев, 2014).

Ранее авторами было проанализировано среднее течение реки Оби. Предыдущие исследования показали в большинстве случаев снижение стока наносов и среднемесячных расходов воды.

Итоги расчета оценки трендов показаны в таблице 2. Для первого метода в виде отношения коэффициента корреляции к его стандартной ошибке и отношения параметра линейного уравнения регрессии к его стандартной ошибке для второго метода. Периоды наблюдения были взяты одинаковыми, с начала наблюдений за среднемесячными взвешенными наносами.

Если соотношение этих величин больше, чем статистика распределения Стьюдента (1,96 при уровне значимости 5%), то тренд считается значимым. Также немало важен коэффициент корреляции и параметр линейного уравнения регрессии, он принят с учетом знака, что в свою очередь показывает направление тренда – снижение характеристик представлено отрицательным трендом, а рост их положительным.

Результаты расчетов трендов для гидропостов, рассматриваемых в данном исследовании, приведены в таблице 2, значимые тренды выделены подчеркиванием.

В г. Барнаул среднемесячные расходы взвешенных наносов снижаются в течение всего периода наблюдений, за исключением августа. В г. Камень-на-Оби значимых трендов по характеристикам среднемесячных расходов взвешенных наносов и среднемесячных расходов воды не наблюдается.

На остальных постах изменения расходов воды и взвешенных наносов неоднозначны. Так, например, на р. Кондома у пгт. Кузедеево по характеристикам среднемесячных расходов взвешенных наносов значимый тренд наблюдается во все месяцы, а по среднемесячным расходам воды наблюдается только в период половодья (рис. 1).

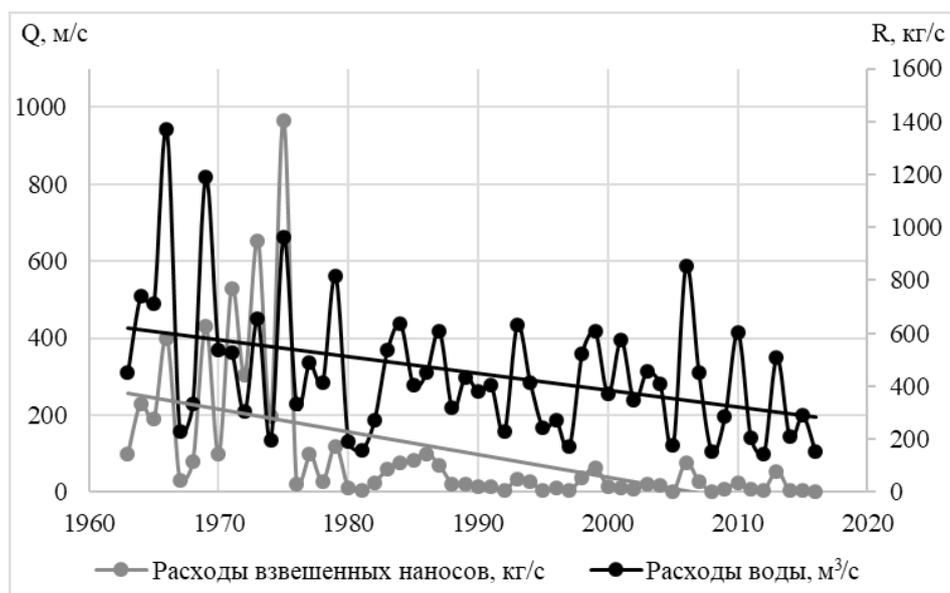


Рис. 1. Многолетние изменения среднемесячных расходов воды ( $Q$ ) и расходов взвешенных наносов ( $R$ ) р. Кондома пгт. Кузедеево, в мае

Таблица 1. Сведения о рассматриваемых гидрологических постах

Река	Гидропост	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Отметки нуля постов, м	Период действия	Наблюдения за наносами
Обь	Дубровино	2876	258000	82,52	18.08.1958	1962–2016
Обь	Камень-на-Оби	3146	216000	109,57	17.11.1893	1950–2018
Обь	Барнаул	3430	169000	127,89	10.11.1893	1936–2018
Чарыш	Чарышский	82	20700	145,04	10.08.1933	1950–2013
Алей	Алейск	155	18700	150,34	17.07.1953	1956–2017
Чумыш	Тальменка	74	20600	132,35	13.11.1934	1963–2018
Иня	Березовка	35	17300	100,01	29.07.1958	1959–2018
Томь	Новокузнецк	580	29800	192,46	09.11.1893	1941–2018
Кондома	Кузедеево	73	7080	223,55	24.06.1931	1963–2016

Таблица 2. Результаты оценки трендов среднемесячных расходов воды и наносов на р. Обь

Гидропост	Расчет тренда по 1 методу							
	р. Обь, г. Барнаул		р. Обь, г. Камень –на – Оби		р. Кондома, пгт. Кузедеево		р. Томь, г. Новокузнецк	
Месяц	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с
Апрель	1,5	<u>-2,6</u>	0,6	1,1	1,9	<u>-4,5</u>	<u>7,5</u>	-0,4
Май	-0,8	<u>-9,2</u>	-0,5	-1,8	<u>-3,9</u>	<u>-5,1</u>	<u>-2,5</u>	<u>-2,1</u>
Июнь	-0,1	<u>-3,4</u>	-0,3	0,6	<u>-2,0</u>	<u>-3,4</u>	<u>-3,5</u>	-1,3
Июль	-0,3	<u>-2,3</u>	0,9	-0,2	-1,8	-1,9	<u>-2,3</u>	<u>-2,1</u>
Август	1,1	-1,5	0,8	-0,1	-0,1	<u>-2,4</u>	0,1	<u>-2,1</u>
Сентябрь	1,1	<u>-3,4</u>	1,6	-1,0	-1,7	<u>-2,1</u>	0,2	-0,6
Октябрь	<u>2,3</u>	<u>-2,7</u>	1,1	-1,4	0,5	<u>-2,1</u>	<u>2,3</u>	<u>-2,2</u>
Гидропост	Расчет тренда по 2 методу							
	р. Обь, г. Барнаул		р. Обь, г. Камень –на – Оби		р. Кондома, пгт. Кузедеево		р. Томь, г. Новокузнецк	
Месяц	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с
Апрель	1,5	<u>-2,3</u>	0,7	1,2	1,8	<u>-4,0</u>	<u>6,5</u>	-0,4
Май	-0,8	<u>-6,2</u>	-0,5	-1,8	<u>-3,6</u>	<u>-4,4</u>	<u>-2,4</u>	<u>-2,0</u>
Июнь	-0,1	<u>-2,7</u>	-0,3	-0,6	1,9	<u>-3,1</u>	<u>-3,3</u>	-1,3
Июль	-0,3	0,1	1,0	-0,2	-1,7	-1,8	<u>-2,2</u>	<u>-2,0</u>
Август	1,1	-1,5	-1,4	-0,1	-0,1	<u>-2,3</u>	0,1	<u>-2,0</u>
Сентябрь	1,1	<u>-2,8</u>	1,6	-1,0	-1,6	<u>-2,0</u>	0,2	0,6
Октябрь	1,2	<u>-2,3</u>	1,1	-1,5	0,5	-1,9	<u>2,2</u>	<u>-2,0</u>
Гидропост	Расчет тренда по 1 методу							
	р. Иня, с. Березовка		р. Чумыш, г. Тальменка		р. Алей, г. Алейск		р. Чарыш, п. Чарышский	
Месяц	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с
Апрель	0,2	<u>-3,6</u>	-0,3	<u>-9,1</u>	<u>-2,0</u>	<u>-11,4</u>	<u>-2,8</u>	-1,9
Май	-1,0	<u>-4,0</u>	<u>-3,4</u>	<u>-3,4</u>	<u>-2,5</u>	<u>-8,4</u>	<u>-2,2</u>	<u>-2,1</u>
Июнь	1,4	1,2	-0,8	<u>-2,0</u>	-0,7	<u>-2,6</u>	-1,7	-1,3
Июль	<u>3,8</u>	<u>4,7</u>	0,2	-1,6	<u>2,4</u>	0,7	0,9	0,3
Август	<u>3,7</u>	<u>4,0</u>	0,8	-0,4	<u>3,8</u>	0,4	-0,4	<u>0,8</u>
Сентябрь	<u>3,8</u>	<u>3,0</u>	0,4	-1,6	<u>5,9</u>	<u>-3,7</u>	-1,4	<u>-2,3</u>
Октябрь	<u>5,3</u>	<u>2,8</u>	1,5	-1,6	<u>8,4</u>	<u>-3,7</u>	-0,3	0,2

Гидропост	Расчет тренда по 2 методу							
	р. Иня, с. Березовка		р. Чумыш, г. Тальмен-ка		р. Алей, г. Алейск		р. Чарыш, п. Чарышский	
Месяц	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с	Q, м <sup>3</sup> /с	R, кг/с
Апрель	0,3	<u>-3,1</u>	-0,3	<u>-6,5</u>	-1,9	<u>-7,9</u>	<u>-2,7</u>	<u>-1,8</u>
Май	-1,1	<u>-3,5</u>	<u>-3,2</u>	<u>-3,0</u>	<u>-2,4</u>	<u>-6,3</u>	<u>-2,1</u>	<u>-2,0</u>
Июнь	1,5	<u>1,2</u>	-0,7	-1,7	-0,6	<u>-2,4</u>	-1,7	-1,3
Июль	<u>4,0</u>	<u>3,9</u>	0,2	-1,4	<u>2,2</u>	<u>0,6</u>	0,9	0,2
Август	3,8	<u>3,3</u>	0,7	-0,4	<u>3,3</u>	0,4	-0,3	0,9
Сентябрь	<u>3,8</u>	<u>2,7</u>	0,4	-1,5	<u>4,9</u>	<u>-12,0</u>	-1,4	<u>-2,2</u>
Октябрь	<u>5,1</u>	<u>2,5</u>	1,4	-1,5	<u>9,7</u>	<u>-12,3</u>	-0,3	0,2

Значимые тренды на снижение среднемесячных расходов взвешенных наносов определены для большинства рассматриваемых притоков Оби (для Ини – только в половодье).

Среднемесячные расходы воды в половодье у большинства рассматриваемых постов значимо снижаются. В летне-осеннюю межень на р. Иня и р. Алей, в основном, тренд получился положительным, на р. Обь и р. Чумыш – также положительный, но меньше критического значения.

Сравнивая численные значения и знаки трендов среднемесячных расходов взвешенных наносов и среднемесячных расходов воды, можно сделать заключение, что полученные ранее выводы о том, что снижение среднемесячных расходов воды влияет на снижение среднемесячных расходов наносов верно не для всех рек и не во все периоды водности.

Идентичность знака значимых трендов среднемесячных расходов взвешенных наносов и среднемесячных расходов воды составляет 75 % случаев (12 из 16).

### Заключение

Тренды среднемесячных расходов взвешенных наносов на Верхней Оби и ее притоках снижаются на всех гидропостах в половодье. На р. Иня в с. Березовка среднемесячные расходы взвешенных наносов, наоборот, увеличиваются в летне-осеннюю межень.

Среднемесячные расходы воды на рассматриваемых постах в большинстве случаев совпадают с трендами среднемесячных расходов взвешенных наносов.

Различие направленности значимых трендов наблюдается у р. Обь в г. Барнауле и р. Томь у г. Новокузнецка в октябре, р. Алей у г. Алейска – в сентябре и октябре.

Не смотря на серьезное антропогенное влияние, оказываемое на речные долины и бассейны рек рассматриваемого региона, изменения многолетнего режима стока взвешенных наносов, в основном, определяется гидроклиматическими причинами.

### Литература

1. Алексеевский Н.И. Формирование и движение речных наносов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 204

с., Михайлов В.Н. Гидрология устьев рек. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 176 с.

2. Дедков А.П., Мозжерин В.И. Глобальный сток наносов в океан. Природная и антропогенная составляющие // Эрозия почв и русловые процессы. 2000. №3. С.15–23.
3. Лю Шугуань, Чалов Р.С. и др. Региональные изменения стока взвешенных наносов Азиатских рек в устьях // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2001. №3. С.75–82
4. Магрицкий, Д. В. Годовой сток взвешенных наносов российских рек водосбора Северного Ледовитого океана и его антропогенные изменения / Д. В. Магрицкий // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2010. № 6. С. 17–24.
5. Мельникова Я.А., Вершинин Д.А. // Сб. докл. Междунар. науч. конф. памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии»; Санкт-Петербург, 28-30 марта 2018 года / под ред. О.М. Макарьевой. СПб.: Научно-технологические, 2018. С. 606–609.
6. Мельникова Я.А., Вершинин Д.А. Многолетние изменения среднемесячных расходов взвешенных наносов реки Оби в пределах Томской области // Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2018. Вып. 4. С. 419–426.
7. Мельникова Я.А., Вершинин Д.А. Оценка многолетнего перераспределения стока взвешенных наносов рек Томской области // Современные проблемы географии и геологии: к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: Матер. IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Т. 1. Томск: Томский гос. ун-т, 2017. С. 377–381.
8. Тананаев, Н. И. Оценка годового стока взвешенных наносов рек Севера Сибири и Дальнего Востока / Н. И. Тананаев // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 694. DOI 10.7868/S0030157414040121.
9. Промахова Е.В. Изменчивость мутности речных вод в разные фазы водного режима : дис. ... канд. геогр. наук / Е.В. Промахова. Москва., 2016. 228 с.

10. Фатуллаев Г.Ю. Современные изменения водных ресурсов и водного режима рек Южного Кавказа (в пределах Каспийского бассейна). Баку, 2002. 167 с.
11. Carroll, C.; Merton, L.; Burger, P. Impact of vegetative cover and slope on runoff, erosion, and water quality for field plots on a range of soil and spoil materials on central Queensland coal mines. *Soil Res.* 2000, 38, pp. 313–328.
12. Cerdan, O.; Govers, G.; Le Bissonnais, Y.; Van Oost, K.; Poesen, J.; Saby, N.; Gobin, A.; Vacca, A.; Quinton, K.; Auerswald, K.; et al. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology* 2010, 122, pp. 167–177
13. Lal, R. Soil degradation by erosion. *Land Degrad. Dev.* 2001, 12, pp. 519–539.
14. Martín-Moreno, C.; Martín Duque, J.F.; Nicolau Ibarra, J.M.; Hernando Rodríguez, N.; Sanz Santos, M.Á.; Sánchez Castillo, L. Effects of topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation: The experimental spoil heap at El Machorro Mine (Central Spain). *Land Degrad. Dev.* 2016, 27, pp. 145–159.
15. Morgan, R.P.C. *Soil Erosion and Conservation*, 3rd ed.; Blackwell Publishing: Oxford, UK, 2009.
16. Wantzen, K.M.; Mol, J.H. Soil erosion from agriculture and mining: A threat to tropical stream ecosystems. *Agriculture* 2013, 3, pp. 660–683.

УДК 551.32

## **МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЛАВИННОГО ПИТАНИЯ ДЛЯ ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКОГО $\alpha$ - $\beta$ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАЛЬНОСТИ ВЫБРОСА ЛАВИН**

**А.И. Кашдан<sup>1\*</sup>, А.А. Ерофеев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Исследовательская группа по прикладной гляциологии, Монреаль, Канада*

<sup>2</sup>*Проблемная научно-исследовательская лаборатория гляциоклиматологии,*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

*\*research@circucity.com*

Рассмотрена новая методика количественной оценки лавинного питания ледников, основанная на анализе рельефа и данных метеорологических наблюдений, реанализа метеорологических полей, а также с использованием методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), распознавания образов, машинного обучения и статистического моделирования. Рассмотрены результаты предварительного применения эмпирического  $\alpha$ - $\beta$  моделирования дальности выброса лавин для ледников Алтая и Канадских Скалистых гор.

*Ключевые слова: лавинное питание, ледник, статистическое моделирование, моделирование  $\alpha$ - $\beta$  дальности выброса, снежная лавина*

A new method of a quantitative assessment of avalanche feeding of glaciers is considered, based on the analysis of the relief and data of meteorological observations, reanalysis of meteorological fields, as well as using the methods of remote sensing of the Earth (ERS), pattern recognition, machine learning, and statistical modeling. The preliminary application of the empirical  $\alpha$ - $\beta$  runout modeling of snow avalanche for the Altai glaciers and the Canadian Rockies is considered.

*Keywords: avalanche nourishment, glacier, statistical modeling,  $\alpha$ - $\beta$  runout modeling, snow avalanche*

Дальность выброса лавин - очень важный параметр для оценки лавинного питания ледников, она определяется из анализа различных источников информации, таких как идентификация геофторфологических признаков и лавинного мусора, историческая информация и информация очевидцев (местных жителей или туристов), дендрогеморфологический анализ, если лавины затрагивают лесную зону, и анализ аэрофотоснимков, а также цифровых моделей местности (ЦМР) и производных карт (Oller et al, 2015). Вычисление дальности схода лавин становится более сложным в районах, где нет исторической информации и отсутствуют дендрохронологические признаки изломанной

и погнутой лавинами растительности. Расчетные эмпирические модели, дополняющие вышеупомянутые информационные источники (данные) и методы, о которых говорилось выше, и являются особенно полезными инструментами в этих сложных ситуациях. Обычно на практике для инженерных целей применяются динамические модели AVAL 1D, RAMMS 2D, подход Перла (Perla, 1980) и другие, а статистические модели (включая статистическую модель  $\alpha$ - $\beta$ ) являются дополнением и используются в комбинации обоих подходов.

Динамические модели обычно предоставляют информацию о скорости, высоте потока, давлении потока и силы удара, дальности выброса лавины, что особен-

но подходит для инженерных целей. Основные ограничения этих моделей заключаются в том, что информация, используемая для их построения (например, объем лавины в зонах зарождения и транзита, а также коэффициенты трения), часто оценивается на основе ограниченного набора доступных данных (Kashdan, 2021). Небольшие вариации входных параметров в моделировании могут привести к большим различиям в расчетах дальности выброса лавин (Lied, 1998; Ancey, 2006).

Основная идея  $\alpha$ - $\beta$  и статистических моделей состоит в том, что при наличии достаточного количества хорошо известных лавин и их параметров, взаимосвязи между данными могут быть найдены как корреляции из законов вероятности (Oller et al., 2021). Эти модели были построены с использованием объективных топографических параметров репрезентативного набора данных для лавин, дальность выброса которых известна для некоторых ледников Алтая и Канадских Скалистых гор.

### Литература

1. Ancey C. Dynamique des avalanches // Presses Polytechniques et universitaires romandes & Cemagref. Lausanne (Switzerland) & Antony (France). 2006.

2. Kashdan A.Y. Engineering Glaciology: Avalanche Risk Assessment // Materials of Conference: Geographic studies of Siberia and the Altai-Sayan transboundary region. Institute of Geography of Altai State University, Barnaul, March 26, 2021, pp. 273–279.
3. Lied K. Snow avalanche experience through 25 years at NGI // Proceedings of the NGI Anniversary Conference. Norwegian Geotechnical Institute, 1998. pp. 7–14.
4. Oller P., Muntán E., García-Sellés C., Furdada G., Baeza C., Angulo C. Characterizing major avalanche episodes in space and time in the twentieth and early twenty-first centuries in the Catalan Pyrenees // Cold Regions Science and Technology. 2015. No 110, pp. 129–148.
5. Oller P., Baeza C., & Furdada, G. Empirical  $\alpha$ - $\beta$  runout modelling of snow avalanches in the Catalan Pyrenees // Journal of Glaciology. 2021. pp. 1–12.
6. Perla R. Avalanche release, motion and impact. In Dynamics of Snow and Ice Masses, S. Colbeck (Editor), 1980. Chapter 7. Academic Press, New York, pp. 397–462

УДК 504.062.2

## ГИДРОЛОГО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ СИБИРИ

С.Г. Копысов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, wosypok@mail.ru

В статье описаны основные предпосылки для комплексного эколого-гидролого-климатического моделирования геосистем. В основу положен метод гидролого-климатических расчётов, реализуемый с помощью современных ГИС на основе открытых данных. В результате раскрываются различные аспекты, обеспечивающие эффективное решение некоторых геоэкологических проблем Сибири. Приводится список основных статей автора на русском языке в рецензируемых журналах.

*Ключевые слова:* водный баланс, ландшафтная гидрология, расчёт биопродуктивности, гидрологические риски

The article describes the main prerequisites for complex ecological, hydrological and climatic modeling of geosystems. It is based on the method of hydro-climatic calculations implemented using modern GIS based on open data. As a result, various aspects that provide an effective solution to some geoecological problems of Siberia are revealed. The list of the author's main articles in Russian in peer-reviewed journals is given.

*Keywords:* water balance, landscape hydrology, calculation of bio-productivity, hydrological risks

Объявленный в конце XX века переход к устойчивому развитию общества предполагает ведение хозяйственной деятельности, не превышающей возможности биосферы, т.е. в основном за счёт возобновляемых ресурсов. Количество доступных к использованию возобновляемых ресурсов определяются, в первую очередь, количеством и степенью соразмерности тепла и влаги на имеющейся территории. Поэтому гидролого-климатические расчёты, выполняемые на

современном инженерном уровне, дают возможность определить природообустроенную биопродуктивность, а значит и оценить возможности биосферы.

Исходя из единства теплового и водного баланса, связанных единым элементом – испарением, важно моделировать и анализировать совместную динамику температуры воздуха и атмосферных осадков, наложенную на рельеф и его почвенный покров. Анализ динамики только температуры воздуха не может дать

правильного понимания текущей ситуации. Так как из синергетики известно, что целое развивается органичнее его частей, а поэтому использование для сложных систем метода суперпозиции, когда сложное явление представляется как простая алгебраическая сумма его составляющих, не всегда дает достоверный результат.

Актуальность предлагаемого подхода заключается в том, что такое комплексное эколого-гидролого-климатическое моделирование геосистем позволяет реализовать идею правильного землепользования, предполагающую практическую реализацию в виде планирования использования земли на основе экологических принципов.

Современной науке свойственно необоснованное разделение областей и предметов исследования, что не позволяет комплексно решать стоящие перед ней задачи. Любое комплексное решение, в принципе, возможно только в общих чертах, отражающих взаимодействие основных процессов в исследуемых системах. Это следует из принципа неопределенности Гейзенберга, являющегося запретом на избыточные уточнения.

Гидролого-климатическое рассмотрение геоэкологических проблем является естественным развитием идеи академиков А.А. Григорьева и М.И. Будыко о том, что интенсивность и направление физико-географического процесса в ландшафтной сфере определяются ресурсами влаги и тепла и их взаимодействием. Профессором В.С. Мезенцевым в 1957 году была разработана лаконичная математическая модель (метод ГКР или гидролого-климатических расчётов) генетического преобразования влаги и тепловых ресурсов в тесной связи друг с другом и во взаимосвязи с почвенным покровом. Метод ГКР имеет небольшое число параметров и позволяет при редкой сети метеонаблюдений привлекать данные модельных реанализов по температурам воздуха и атмосферным осадкам в ячейках раstra и выполнять расчет текущих водно-тепловых балансов с заданным интервалом дискретности. Ранее метод ГКР получил развитие в работах его учеников и соратников И.В. Карнацевича, А.Т. Напрасникова, Г.В. Белоненко, О.В. Мезенцевой и других.

В практической реализации метода ГКР являлся нерешенным вопрос пространственного учета ландшафтных условий. Сегодня этот вопрос решается с помощью общедоступных ГИС на основе общепринятых ландшафтно-географических представлений (Глушков В.Г., Сочава В.Б., Антипов А.Н., Кoryтный Л.М., Виноградов Ю.Б.). Проблемы пространственной организации геосистем решаются с помощью методов геоморфометрии (Шарая Л.С., Шарый П.А.). Определенные сложности возникают при параметризации почвенного покрова обширных территорий. Этот вопрос надо решать в комплексе с почвенной гидрологией (Мичурин Б.Н., Лытаев И.А., Шеин Е.В., Архангельская Т.А.) путём развития инженерно-экологического почвоведения (Росновский И.Н.).

При оценке биологической продуктивности геосистем учитывается, что в сходных условиях тепло-

беспеченности биологическая продуктивность определяется степенью влагообеспеченности растений, а в сходных условиях влагообеспеченности – общей теплообеспеченностью (Шашко Д.И., Сляднев А.П., Напрасников А.Т.). Для валидации модельных решений и решения проблемы геоботанического прогнозирования необходима интеграция метода ГКР с количественной характеристикой растительного компонента, например, со степенями увлажнения по шкале Л.Г. Раменского, характеризующими условия местообитания по составу растительности.

В вопросах природопользования следует опираться на труд Ю. Одума, считавшего организацию правильного землепользования самым важным практическим приложением науки об окружающей среде. Такая постановка проблемы для России вполне традиционна, еще в конце XIX века В.В. Докучаев предпринимал меры по оптимизации природных систем, т.е. занимался природообустройством. Однако, никто не предлагал комплексного ландшафтного решения в виде эколого-гидролого-климатического моделирования геосистем на основе минимального количества исходной информации.

Целью данного исследования является выявление гидролого-климатических аспектов, обеспечивающих эффективное решение геоэкологических проблем Сибири.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи, позволяющие раскрыть гидролого-климатические аспекты геоэкологии Сибири:

- Обосновать геоэкологические основы для выполнения гидролого-климатических расчётов с использованием основных характеристик ландшафта и почвогрунтов;

- Предложить алгоритм расчёта потенциального распространения биоценозов и их продуктивности на ландшафтной основе с использованием общедоступных ГИС;

- Выполнить верификацию полученных результатов моделирования по литературным данным, данным полевых наблюдений и сравнением с результатами других моделей гидрологического цикла;

- Дать краткосрочный прогноз экосистемных изменений на основе моделирования рядов элементов водного баланса;

- Выработать принципы гидролого-климатической оптимизации структуры и способов землепользования, приводящих к минимизации геоэкологических рисков с учётом естественного хода развития природы.

Моделирование элементов водного баланса производилось по методу гидролого-климатических расчётов В.С. Мезенцева с использованием разработок И.В. Карнацевича (2011) на основе данных об осадках и температурах воздуха из базы данных ВНИГМИ-МЦЦ и реанализов, а также использованием моими коллегами (Ерофеев, 2015, 2018; Елисеев, 2020) технологий геоинформационного моделирования.

Известно, что из всех элементов водного баланса наиболее точно измеряется поверхностный русловой сток воды, отражающий текущую влажность деятель-

ного слоя на малом водосборе. Поэтому на четырех малых водосборах в разных природно-климатических условиях были установлены системы автоматического мониторинга. Все приборы разработаны и произведены в ИМКЭС СО РАН (Кураков С.А.). Модельные водосборы были обустроены в зоне олиготрофных болот южной тайги, зоне бугристых болот лесотундры, предгорной зоне южной тайги и в горно-ледникового зоне. Для учёта стока воды использовались различные методы гидравлических расчётов, а также локальная эмпирическая зависимость расхода воды от шума потока (подана заявка на полезную модель).

Для решения поставленных задач и верификации полученных по методу гидролого-климатических расчетов результатов использована модель HBV-light (Seibert, 2005; Seibert, Vis, 2012) в базовой простой Windows-версии, позволяющей оперировать имеющимися в регионе данными сетевых наблюдений за атмосферными осадками и температурой воздуха с суточным разрешением и в интерактивном режиме выполнять калибровку параметров и анализировать результаты расчетов.

При определении количественных характеристик почвенного покрова использовался метод почвенных монолитов (Агрофизические методы ..., 1966) и расчётные методы для определения удельной поверхности, водно-физических и тепловых характеристик почвы (Мичурин Б.Н. и Лытаев И.А., 1967; Чудновский А.Ф., 1959; Росновский И.Н., 1993, 2001).

Методика расчета потенциальной биопродуктивности построена на основе обобщения, выполненного В.Т. Дмитриевой и А.Т. Напрасниковым (2012), по информации о биологической продуктивности различных природных зон мира в связи с теплоэнергетическими ресурсами испарения вегетационного периода и относительной увлажненностью местообитания.

Раскрытые гидролого-климатические аспекты геоэкологии сводятся к следующим положениям:

1. На основе интеграции гидролого-климатических расчетов со ступенями увлажнения (СУ) по экологической шкале Л.Г. Раменского, характеризующей условия местообитания по составу растительных сообществ, разработан метод, позволяющий прогнозировать экосистемные изменения и оценивать качество земель для сельского и лесного хозяйства;
2. Доступность автоматического мониторинга термического режима подстилающей поверхности позволяет осуществлять эффективный мониторинг режимов увлажнения различных биогеосистем;
3. На основе региональной оценки изменения гидроклиматических ресурсов (2021–2030 гг.) для территории Западной Сибири подготовлен краткосрочный прогноз экосистемных изменений, отражающий тенденции изменения растительного покрова на разных территориях, согласно которому расчетная амплитуда ступеней увлажнения в прогнозный период не превышает современных границ местообитаний по фактору увлажнения;

4. Для эффективного снижения экстремальных пиков гидрографов стока оптимальная заболоченность речных бассейнов лесоболотной зоны Сибири должна составлять 20–70%, а площадь водосбора, покрытая лесом, не должна быть менее 15%, так как разнообразие типов подстилающей поверхности на речном водосборе сглаживает колебания уровней воды и уменьшает вероятность опасных гидрологических явлений.

Подтверждение достоверности полученных результатов базируется на анализе и синтезе ранее выполненных научно-исследовательских работ по предмету исследования, применением в исследованиях апробированных методов моделирования водного цикла, использованием официальной гидрометеорологической информации. Достоверность подтверждается аналитической верификацией результатов моделирования и экспериментальными полевыми наблюдениями. В результате моделирования выяснилось, что точность распределения точечных метеорологических данных на исследуемые ландшафты и правомерность задания параметров, используемых в модели, в значительной степени определяют достоверность получаемых результатов. Поэтому на локальном уровне возможны значительные ошибки, обусловленные грубостью моделей рельефа, но при переходе на более высокий уровень рассмотрения ошибки сглаживаются и удается получать практически приемлемый результат.

#### Литература

1. Копысов С.Г. Оптимальная заболоченность лесоболотной зоны Западной Сибири // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2009. Вып. 3 (81). С. 143–144.
2. Копысов С.Г. Восстановление гидрографической сети водосборов – основной способ борьбы с заболачиванием водоразделов // Водное хозяйство России, 2010. №5. С. 96–103.
3. Копысов С.Г. Параметры экологически допустимой разработки Бакчарского железорудного месторождения // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология, 2011, №5, С. 420–425.
4. Копысов С.Г. Параметрический учёт ландшафтных условий стока в методе гидролого-климатических расчётов // География и природные ресурсы. 2014. №3. С. 157–161.
5. Копысов С.Г. Многолетний гидрологический режим западин юга таёжной зоны Западной Сибири // Известия РАН. Серия географическая. 2015. №5. С. 130–134.
6. Копысов С.Г., Ярлыков Р.В. Опыт организации гидролого-климатических наблюдений на малых модельных водосборах Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 12. С.115–121.
7. Копысов С. Г. Расчет элементов водного баланса гидроморфных ландшафтов по водно-физическим свойствам почвенного покрова // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 1. С. 26–30.

8. Паромов В.В., Земцов В.А., Копысов С.Г. Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. №1. С.62–74.
9. Ерофеев А.А., Копысов С.Г., Никифоров А.Н. Ландшафтно-геофизический подход к зонированию структуры землепользования на малом водосборе // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. №6. С. 39–47.
10. Елисеев А.О., Копысов С.Г. Ландшафтно-экологическое моделирование водного баланса юго-востока Западной Сибири // Водное хозяйство России. 2020. №2. С. 102–117.
11. Копысов С.Г., Земцов В.А., Мацуяма Х., Елисеев А.О. Моделирование гидрографов стока арктических рек Западной Сибири в программе HBV-light для оценки экстремальных расходов половодья // Геосферные исследования. 2020. №4. С. 108–120.

УДК 556.552

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ВОДНОГО БАЛАНСА КРАСИЛОВСКОГО ОЗЕРА НА ОСНОВЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

С.Г. Копысов<sup>1,2</sup>, К.Д. Федосин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Томск, Россия, kirill.tomsk@mail.ru

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
wosypok@mail.ru

В статье кратко показана методика расчета испарения с поверхности Красиловского озера и результаты ее применения для оценки структуры водного баланса. Расчёты выполнены за период 1977–2019 гг. по средним месячным данным метеостанций Барнаул и Бийск-Зональная. Анализ расчётного водного баланса показал, что через песчаную плотину, сформировавшую озеро, просачивается 165 м<sup>3</sup>/год. Из этого следует, что Красиловское озеро не является типичным бессточным озером. Поэтому в общий комплекс мониторинга на озере необходимо включить гидрогеологический мониторинг.

*Ключевые слова:* водный баланс, расчёт испарения, Красиловское озеро, температура поверхности

The article briefly shows the method of calculating evaporation from the surface of Krasilovsky Lake and the results of its application to assess the structure of the water balance. The calculations were performed for the period 1977-2019 according to the average monthly data of the Barnaul and Biysk-Zonalnaya weather stations. The analysis of the calculated water balance showed that 165 m<sup>3</sup> /year seeps through the sand dam that formed the lake. It follows from this that Krasilovsky Lake is not a typical drain less lake. Therefore, it is necessary to include hydrogeological monitoring in the general monitoring complex on the lake.

*Keywords:* water balance, evaporation calculation, Krasilovsky Lake, surface temperature

Для юга Западной Сибири на протяжении последних веков характерно усыхание бессточных озёр. Для выявления причин и количественной характеристики этого процесса необходимо по доступным рядам метеорологических наблюдений рассчитать элементы водного баланса, в первую очередь испарение с водной поверхности озёр. Сложность задачи заключается в необходимости иметь для этих целей температуру поверхностного слоя воды. Эта задача обычно решается на основе уравнения теплового баланса поверхности озёр.

Озеро Красиловское является моделью для изучения малых бессточных озёр лесостепной зоны не только Алтайского края, но и всей России. Считается, что в России на сегодняшний день насчитывается всего две научно-исследовательские станции по изучению бессточных лесостепных озёр, одна из которых на территории базы учебных практик Алтайского государственного университета «Озеро Красилово».

Для составления водного баланса озера необходимо знать испарение с его поверхности. Если известна температура поверхности воды, то расчет испарения с водоемов производится по формуле ГГИ (Мишон, 1983):

$$E = 0.14n(e_0 - e_2)(1 + 0.72u_2) \text{ мм} \quad (1)$$

где  $e_0$  - среднее значение максимальной упругости водяного пара, вычисленное по температуре поверхности воды в водоеме;  $e_2$  - среднее значение упругости водяного пара над водоемом на высоте 2м;  $u_2$  - средняя скорость ветра над водоемом на высоте 2м, м/с;  $n$  - число дней в расчетном интервале времени.

Для определения температуры поверхности воды решается система из двух уравнений описывающих тепловой баланс водоема. Сумма составляющих баланса приравнивается изменению количества тепла в водоеме за расчётный промежуток времени (Мишон, 1983).

Расчёт теплового баланса производился по осреднённым срочным данным метеостанций Барнаул и Бийск–Зональная, удаленных от центра водосбора на 50 и 65 км соответственно. Альbedo водной поверхности принималось равным среднему дневному значению 0,074 (Мишон, 1983).

Самой ресурсоёмкой задачей является обработка большого набора данных наблюдений с метеостанций, который был получен с сайта <http://meteo.ru/>. В первую очередь необходимо было усреднить срочные данные наблюдений до среднесуточных значений. Для

этих целей использовались сводные таблицы на базе «Google Sheets». Для облегчения расчётов была написана программа на языке программирования Python, позволяющая решать систему уравнений, описывающих тепловой баланс водоема. Результаты расчётов представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Расчёт испарения с площади водосбора, питающей озеро, производился методом гидролого-климатических расчётов, ранее (Паромов и др., 2017) реализованным для прогнозирования гидроклиматических ресурсов.

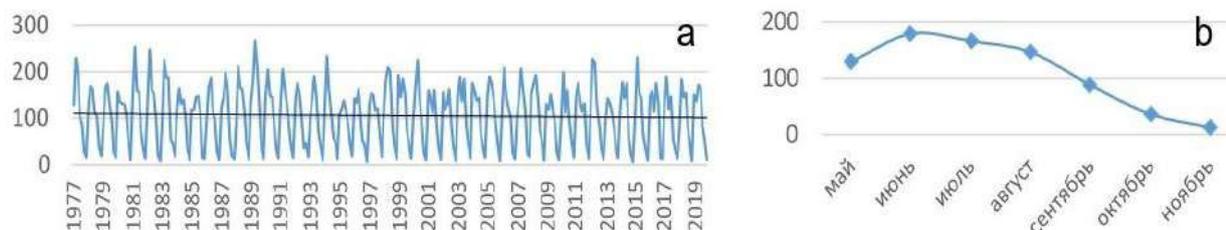


Рис. 1. Испарение с поверхности озера (а) и его осредненное внутригодичное распределение (б), мм/мес

Таблица 1. Водный баланс озера Красиловское за 1977–2019 гг

Водно-балансовый год (ВБГ)	Е с озера, мм/год	Осадки за ВБГ, мм/год	Е на водосборе, мм/год	Е сум., мм/год	Приток воды в озеро, мм/год	Объем притока воды в озеро, м <sup>3</sup>	Расчётное изменение УВ, см в год
1977-78	788	498	439	447	51	3113	+2,2
1978-79	739	435	430	437	-3	-165	-0,1
1979-80	686	528	441	446	82	4989	+3,6
1980-81	707	344	402	409	-65	-3974	-2,8
1981-82	840	473	476	484	-11	-665	-0,5
1982-83	833	468	499	507	-39	-2372	-1,7
1983-84	820	472	453	461	10	624	+0,4
1984-85	687	500	461	466	33	2033	+1,4
1985-86	671	587	437	442	145	8849	+6,3
1986-87	704	358	453	459	-100	-6123	-4,4
1987-88	711	418	480	486	-67	-4109	-2,9
1988-89	789	404	392	401	2	141	+0,1
1989-90	942	446	407	419	27	1662	+1,2
1990-91	785	589	454	462	127	7729	+5,5
1991-92	777	453	428	436	18	1091	+0,8
1992-93	679	507	429	435	72	4404	+3,1
1993-94	702	503	444	450	53	3209	+2,3
1994-95	727	508	443	449	58	3550	+2,5
1995-96	633	510	437	441	69	4210	+3,0
1996-97	641	477	449	453	24	1470	+1,0
1997-98	755	351	395	403	-52	-3179	-2,3
1998-99	842	460	401	411	49	2986	+2,1
1999-00	800	427	397	406	21	1294	+0,9
2000-01	750	533	458	464	69	4209	+3,0
2001-02	705	594	444	450	143	8751	+6,2

2002-03	693	635	492	497	138	8430	+6,0
2003-04	788	449	439	447	2	99	+0,1
2004-05	734	523	437	444	79	4805	+3,4
2005-06	796	450	406	415	35	2140	+1,5
2006-07	740	561	449	456	105	6387	+4,7
2007-08	759	469	445	452	17	1022	+0,7
2008-09	787	421	421	430	-9	-519	-0,4
2009-10	647	525	434	439	86	5266	+3,8
2010-11	736	431	437	444	-12	-746	-0,5
2011-12	761	450	370	379	71	4336	+3,1
2012-13	829	397	387	397	-1	-54	-0,0
2013-14	607	592	453	456	136	8286	+5,9
2014-15	703	574	451	456	117	7142	+5,1
2015-16	745	498	462	468	30	1816	+1,3
2016-17	755	557	462	469	89	5409	+3,9
2017-18	694	528	422	428	100	6105	+4,4
2018-19	682	437	430	435	2	120	+0,1
2019-20	769	437	406	415	23	1375	+1,0
среднее	760	495	446	454	41	2503	+1,8

По данным системы инструментального мониторинга (Зуев и др., 2016; Суторихин и др., 2019, 2020), уровень воды в озере Красиловское за период с сентября 2015 по октябрь 2018 года понизился на 27 см. По нашим расчётам (табл. 1), в 2015–16 году уровень должен был вырасти на 3,9 см, в 2016–17 году еще на 4,4 см, а в 2018–19 году - на 0,1 мм. В целом за три года уровень должен был увеличиться на 8,4 см.

Такое несоответствие расчётов с измерениями уровня можно списать на погрешность расчётов, но, если учесть геологические условия происхождения озера, то можно сделать более интересные выводы. Так согласно Б.А. Лузгину (1998), в своё время песчаные гряды перекрыли русло безымянной реки, левого притока р. Бобровка, в результате чего выше подпруды образовался исследуемый водоём. Поэтому расходная часть водного баланса озера включает в себя затраты на фильтрацию и испарение (Малолетко, 2008). Фильтрация воды из озера осуществляется в северо-западном направлении через болото Долгонькое.

Снижение уровня в период с сентября 2015 по октябрь 2018 года на 27 см, означает, что через песчаную плотину, образовавшую озеро, должно было профильтроваться 495 м<sup>3</sup>. Из них 116 м<sup>3</sup> – за счёт притока воды в озеро, а 378 м<sup>3</sup> – за счёт снижения уровня воды в озере. Таким образом, из озера должно фильтроваться 165 м<sup>3</sup>/год или 0,45 м<sup>3</sup>/сут. Из этого можно сделать вывод, что озеро Красиловское не является типичным бессточным озером, явно отражающим только климатические изменения. Поэтому в общий комплекс мониторинга на озере необходимо включить также гидрогеологический мониторинг.

#### Литература

1. Зуев В.В., Зуева Н.Е., Кураков С.А., Суторихин И.А., Харламова Н.Ф. Динамика весеннего подъема уровня бессточных озёр (на примере озера Красиловское Алтайского края) // География и природ. ресурсы. 2016. № 4. С. 126–134.
2. Лузгин Б. Н. Происхождение Красиловского озера // Изв. Алт. ун-та. Сер. Химия, география, биология. 1998. С. 113–116.
3. Малолетко А.М. Эволюция речных систем Западной Сибири в мезозое и кайнозое. Томск: Томский государственный университет. 2008. 288с.
4. Мишон В.М. Практическая гидрофизика. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 176с.
5. Паромов В.В., Земцов В.А., Копысов С.Г. Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986–2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021–2030 гг. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. №1. С. 62–74.
6. Суторихин И.А., Харламова Н.Ф., Самойлова С.Ю., Коломейцев А.А., Кураков С.А. Уровненный режим озера Красиловское (Алтайский край) в 2013–2017 гг. // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. 2019. С. 63–70.
7. Суторихин И.А., Самойлова С.Ю., Коломейцев А.А., Кураков С.А. Динамика гидрометеорологических условий и параметров снежного покрова в бассейне бессточного пресноводного озера Красиловское (Алтайский край) в 2013–2017 годы // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2020. № 2(57). С. 64–74.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАЛЫХ РЕК (НА ПРИМЕРЕ РЕКИ ВЕРЕЖКА ЮХНОВСКОГО РАЙОНА КАЛУЖСКОЙ ОБЛАСТИ)

В.В. Литвиненко, Р.Р. Шакиров

*Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия  
vl.litv7@mail.ru, rustam-shakirov00@inbox.ru*

Представлены результаты использования открытых данных дистанционного зондирования Земли, для измерения морфометрических характеристик малых рек, с использованием инструментов географической информационной системы. Приведены морфометрические характеристики реки Вережка Юхновского района, Калужской области, представлена карта бассейна реки, проведены наблюдения за параметрами реки в период весеннего паводка 2021 года с использованием открытых космических снимков среднего пространственного разрешения.

*Ключевые слова: Вережка, Калужская область, ДЗЗ, малые реки, ГИС*

The results of the use of open data of remote sensing of the Earth, for measuring the morphometric characteristics of small rivers, using the tools of the geographical information system are presented. The morphometric characteristics of the Verezhka River in the Yukhnovsky district, Kaluga Region are presented, a map of the river basin is presented, observations of the river parameters during the spring flood of 2021 were carried out using open satellite images of medium spatial resolution.

*Keywords: Verezhka, Kaluga region, remote sensing, small rivers, GIS*

Длина большинства рек России не превышает 25 км, поэтому их относят к типу малых и очень малых рек (Курдов, 1995). Малые реки, в первую очередь, подвержены неблагоприятному антропогенному воздействию, и от их состояния во многом зависит устойчивость всей озерно-речной системы в целом. Многие малые реки, даже находящиеся в густонаселенных регионах страны, изучены слабо или не изучены вовсе. Во время подготовительного периода исследования авторами за предыдущие 20 лет не было обнаружено в открытых источниках публикаций, посвященных р. Вережка, что повышает актуальность исследования.

В современном мире, большое значение в исследованиях объектов гидросферы в целом и малых рек в частности, оказывает использование данных дистанционного зондирования Земли. Все больше информации ДЗЗ становится доступно в формате открытых данных, что облегчает и повышает возможность использования их для исследовательских проектов некоммерческого характера, с ограниченными финансовыми возможностями.

В работе были использованы открытые данные мультиспектральной спутниковой съемки среднего разрешения Европейского космического агентства (ESA), полученные со спутников Sentinel-2A/B с пространственным разрешением снимков 10–20 м/пиксель. Помимо этого, были использованы одноканальные космические снимки высокого и сверхвысокого разрешения «WorldView» и «IKONOS» (пространственное разрешение 1–0,5 м/пиксель), открыто распространяемые компанией «Яндекс», а также данные космической радиолокационной съемки NASA полученные

в рамках проекта SRTM с пространственным разрешением 30 м/пиксель. Данные ДЗЗ обрабатывались с использованием географических информационных систем QGIS и SAGA, относящихся к свободно распространяемому типу программного обеспечения.

На основе имеющихся открытых данных нами были изучены отдельные морфометрические параметры реки, определенные стандартом организации (СТО ГГИ 52.08.40-2017): площадь водосбора, количество притоков, густота речной сети, характеристика рельефа, гидрографическая длина реки, ширина русла на отдельных створах, извилистость реки, относительная лесистость бассейна реки. Помимо этого, на основе открытых данных ДЗЗ было проведено сравнение отдельных характеристик реки в период летней межени (июль) и весеннего паводка (апрель) 2021 года.

Река Вережка, является левым притоком р.Угра и глобально относится к бассейну Волги. Исток реки расположен в районе урочища «Клячино» Износковского района Калужской области, большая часть реки и водосборного бассейна расположена в пределах Юхновского района Калужской области. Низовья реки вплоть до устья находятся на территории национального парка «Угра». Река по своим характеристикам относится к классу малых рек с площадью бассейна 187,18 км<sup>2</sup> (рис. 1). На основе космических снимков четко выделяются 13 притоков, все они, по отношению к Вережке, имеют первый порядок. Наиболее крупные притоки впадают в Вережку с левой стороны. Густота речной сети составляет 3,47 км/км<sup>2</sup>. Относительная лесистость бассейна реки (площадь покрытой лесом части водосборного бассейна) равна 157,06 км<sup>2</sup>.

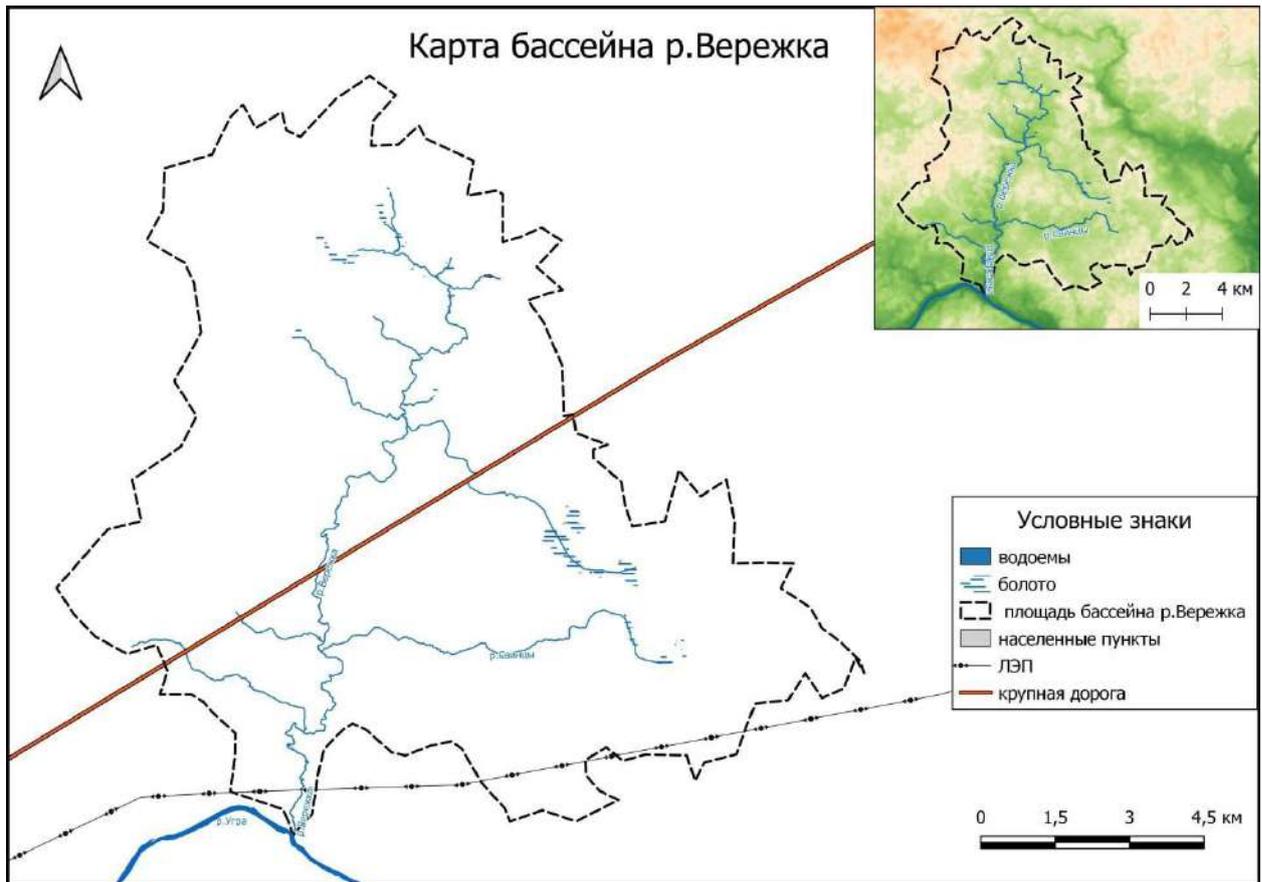
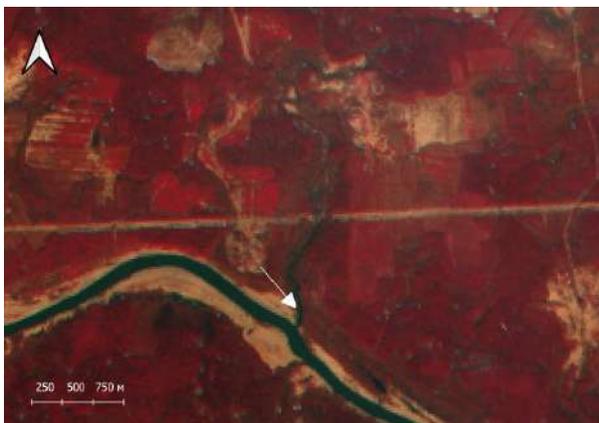


Рис. 1. Карта-схема водосборного бассейна реки Вережка (Шакиров, 2021)

а



б



Рис. 2. Низовье р. Вережка (обозначено стрелкой) в период весеннего паводка 14 апреля 2021 года (а) и в летнюю межень 7 июля 2021 года (б). Снимки КА Sentinel-2A/B, искусственные цвета, каналы 8,4,3

Длина реки 21,5 км, гидрографическая длина реки составляет 23 км. Коэффициент извилистости равен 1,77, а падение реки, на основе анализа данных радиолокационной съемки (проекта SRTM) 35 метров.

Уверенное и надежное измерение ширины малых рек по космическим снимкам, возможно только с использованием снимков высокого, а лучше сверхвысокого разрешения и преимущественно на открытых участках или, что сложнее, на участках с разреженной

древесной растительностью. Для таких целей, наиболее целесообразно использовать снимки, сделанные в осенний период, после завершения листопада, но до установления снежного покрова. Ширина русла в верховьях Вережки, составляет 1,5–2 метра, в среднем течении 2–3, в низовьях ширина увеличивается до 5–6 метров.

Тем не менее, для наблюдения за малыми реками, можно, применять космические снимки среднего или (что лучше), снимки, вплотную приближающиеся к

группе высокого пространственного разрешения. К такому типу относятся снимки с КА Sentinel-2, находящиеся в свободном, открытом доступе.

В 2015 году Европейским космическим агентством был осуществлен запуск двух космических аппаратов Sentinel-2 с индексами А и В. Бортовое оборудование КА позволяет проводить регулярную оптическую съемку поверхности в мультиспектральном режиме с пространственным разрешением от 10 до 60 метров на пиксель. Такие характеристики снимков, совместно с высоким спектральным разрешением, позволяют применять их для наблюдения за малыми реками с использованием прямых и косвенных дешифровочных признаков, а также проведения измерений отдельных их характеристик на не покрытых лесом участках. Использование подобных снимков, с использованием различных спектральных комбинаций, позволяет проводить оперативные наблюдения за гидрологическим режимом открытых участков малых рек, в том числе за продолжительностью паводка, изменением ширины русла, на основе прямых измерений в ГИС, а также по характеру затопления элементов поймы реки. На рисунке 2, представлены два космических снимка устья р. Вережка выполненных в период пика весеннего паводка 2021 года и в период летней межени, в июле текущего года. Ширина русла реки, в период паводка, увеличивалась до 15–17 метров, что в три раза больше средней ширины реки в межень.

Использование открытых данных дистанционного зондирования Земли применимо для изучения малых рек, особенно, учитывая некоммерческий характер большинства подобных исследований и, как следствие, ограниченность финансовых ресурсов. Тем не менее, получение подробных и высокоточных результатов достижимо только в комплексном исследовании, с обязательным включением традиционных полевых изысканий.

### Литература

1. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.Н. Шихов, А.П. Герасимов, А.И. Пономарчук, Е.С. Перминова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. Пермь, 2020. 191 с.: ил.
2. Курдов А. Г. Реки Воронежской области (водный режим и охрана) / А. Г. Курдов / Воронеж. гос. ун-т. Воронеж, 1984. 164 с.
3. Космические снимки высоко разрешения URL: <https://yandex.ru/maps>
4. Снимки с КА Sentinel-2 URL: <https://earthexplorer.usgs.gov>
5. Радиолокационная топографическая съемка (проект SRTM) URL: <https://srtm.csi.cgiar.org>

УДК 556.16

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕПЛОВОГО СТОКА РЕК СЕВЕРО-ВОСТОКА АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ И ОЦЕНКА ЕГО ВЕЛИЧИНЫ

Д.В. Магрицкий

*Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, magdima@yandex.ru*

В статье на основе новых данных наблюдений на 231 посту выполнен региональный анализ многолетних колебаний теплового стока рек Северо-востока АТР, выявлены их особенности. Они рассмотрены через призму изменений температуры и расходов воды рек. Оценен тепловой сток рек, впервые построены карты модуля теплового стока, температур воды, зависимости теплового стока от стока воды, площади и средней высоты водосбора, предложены инструменты для расчета теплового стока неизученных рек региона.

*Ключевые слова: река, пост, тепловой сток, изменения во времени и в пространстве, методика расчета*

On the basis of new hydrological data at 231 gauges, a regional analysis of long-term fluctuations of heat flux of the rivers in the North-East of the APR was performed, their features were identified. They are compared with changes in water temperature and discharges. The heat flux characteristics were estimated, maps of the heat flux modules, water temperatures, the dependence of the heat flux on the water runoff, the area and the average height of catchment were built, tools for calculating the heat flux of unexplored rivers were proposed.

*Keywords: river, gauge, heat flux, changes over time and area, calculation method*

Тепловой сток рек – важный фактор гидроэкологического состояния водных объектов, их термического и ледового режима, переформирования речных русел

и берегов, сложенных многолетнемерзлыми породами. Накопленное большими реками и переносимое далеко на север тепло оказывает свое воздействие на климат

арктических и приарктических территорий, ледовые условия и тепловой баланс прибрежной зоны арктических морей, состояние аквальных и околводных экосистем. Роль этого фактора зависит от температурных условий в бассейне, размера, географического положения и направления течения реки, рассредоточения стока между протоками и рукавами, водного и термического внутригодового режима, источников питания. Она меняется, реагируя на крупномасштабные климатические изменения и гидротехнические мероприятия (Магрицкий, 2009; Магрицкий и др., 2004; Magritsky et al., 2018). Характер и перспективы этой трансформации мало изучены, особенно в отношении малых и средних рек.

Одной из таких «terra incognita», безусловно, следует считать Северо-восток АТР, включающий северные районы Республики Саха (Якутия), Чукотский АО и север Магаданской области. Регион находится полностью в зоне вечной мерзлоты, отличается суровым климатом и дефицитом тепла, обилием многочисленных рек – от самых малых до крупнейших как Лена. Поэтому значимые изменения термического состояния этих самых рек чреваты серьезными гидрологическими, морфологическими, экологическими и экономическими последствиями, как на отдельных участках, так и в целом для региона. В рамках грантов РФФИ №18-05-60021 (Арктика) и РНФ № 21-17-00181 (бассейн Лены) было выполнено комплексное исследование термического состояния рек и его климатически обусловленных и антропогенных изменений; для большинства из рек, имеющих гидропосты, оценен тепловой сток ( $W_T$ ), выявлены закономерности и причины его пространственно-временной изменчивости. Информационной основой работы послужили электронные массивы гидрометеорологической информации (вплоть до 2017/2019 гг.): по температуре воздуха и осадкам на 34 метеостанциях, расходам воды на 150 гидропостах, температуре воды на 231 посту, а также многослойная ГИС и определенные с ее помощью границы и параметры речных водосборов. Тепловой сток (с декадной и месячной дискретностью) рассчитывался по формуле из (Магрицкий и др., 2004; Методические..., 1961):

$$W_T = c_p \rho t W, \quad (1)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость воды (кДж/кг·°C),  $\rho$  – плотность воды (кг/м<sup>3</sup>),  $t$  – средняя за декаду или месяц температура воды (°C),  $W$  – объем стока воды (м<sup>3</sup>) за декаду или месяц. Тепловой сток за год получен суммированием декадных или месячных величин. Для приведения рядов к единому многолетнему периоду были рассмотрены связи теплового стока с температурами и расходами воды ( $Q$ ), и сделан вывод о доминирующем влиянии именно стока воды на тепловой сток. Теснота связей  $W_T = f(Q)$  характеризуется коэффициентами корреляции от 0,8 до 0,95, возрастающая у рек в бассейнах Яны и Индигирки, в верховьях Колымы, т.е. с переходным (между тьянь-шанским и восточно-сибирским) типом водного режима, а также в нижней части бассейна р. Вилюй.

Обработка многолетних рядов месячного и годового теплового стока рек Северо-востока АТР позволила оценить его основные характеристики, и увидеть особенности многолетних колебаний  $W_T$  изменений по территории. Установлено, что период с конца 1980-х гг. отличают более высокие величины  $W_T$  по сравнению с предыдущими годами (с 1955/1960–1987 гг.), как следствие усилившегося нагрева речных вод (из-за роста температур воздуха) и увеличившегося у большинства рек водного стока. Это – всеобъемлющий региональный процесс с внушительными положительными аномалиями: 24% рассмотренных рядов демонстрируют относительный рост теплового стока до 10%, 34% – в диапазоне от 10 до 20%, 18,5% – от 20 до 30%, 21% – свыше 30%. Наибольших значений положительные аномалии достигли в арктическом секторе региона и в гористых частях Яно-Колымского района. Здесь и больше всего статистически значимых нарушений однородности рядов по среднему, согласно непараметрическому критерию Манна-Уитни (U-test, при уровне значимости  $\alpha=5\%$ ). Начало заметного роста теплового стока обнаружено, в основном, с конца 1980х гг., а на реках восточнее р.Яны – со второй половины 1990х гг. – начала 2000х гг. Исключение составили лишь реки Чукотского АО. В 1990х и особенно 2000–2010х гг. это увеличение продолжилось на реках в бассейнах Яны, Индигирки, Колымы, северного побережья Охотского моря и остановилось, или даже сменилось снижением (с середины – второй пол. 2000х гг.) на реках западного сектора региона (к западу от Верхоянского хр.), за исключением верховьев Анабара и Оленька. В результате, в западном секторе на многих реках тренды за 1988–2017/2018 гг. отрицательные, правда, статистически незначимые по непараметрическому критерию Спирмена, с преобладающими величинами в диапазоне до -10 %/10 лет. Основная причина – естественное снижение водности этих рек. В восточном секторе тренды положительные и почти в половине случаев статистически значимые. Величина тренда в 33% случаев <10 %/10 лет, 52% случаев – от 10 до 20 %/10 лет, 15% – >20 %/10 лет. В бассейне Анадыря и к северу от него ситуация неопределенная ввиду отсутствия данных наблюдений в XXI в. Нарушение однородности рядов по дисперсии по критерию Фишера (F-test) зафиксировано на 15 (из 38) опорных гидропостах, главным образом в восточном секторе, в т.ч. из-за наличия существенно положительного тренда. Одним из мощных факторов изменений термического режима и теплового стока Вилюя и Колымы стали создание и эксплуатация крупных водохранилищ (Магрицкий, 2009, 2015).

Закономерности изменения теплового стока рек по территории иллюстрирует первая в своем роде «Карта модуля годового теплового стока» (рис. 1), построенная по данным 112 постов, отвечающая условиям периода 1950/1955–2018 гг. Изолинии проводились методом линейной интерполяции и с учетом рельефа, влияние которого учтено посредством связей  $W_T = f(H_{cp})$ , где  $H_{cp}$  – средняя высота водосбора над уровнем моря.

Эта карта – главный инструмент новой методики расчета теплового стока для условий отсутствия данных. Для решения подобной задачи ранее уже предлагалось несколько подходов (Ёлшин, 1988; Иванов, Куржунов, 1980; Куржунов, 1984), включая региональные зависимости теплового стока от объема стока

воды ( $W$ ) и площади водосбора ( $F$ ), опубликованные автором еще в (Геоэкологическое..., 2007; Магрицкий, 2009). Но вида готовых рекомендаций они так не получили. Согласно предложениям автора, оценить величину годового теплового стока неохваченных сетью наблюдений рек можно несколькими способами.

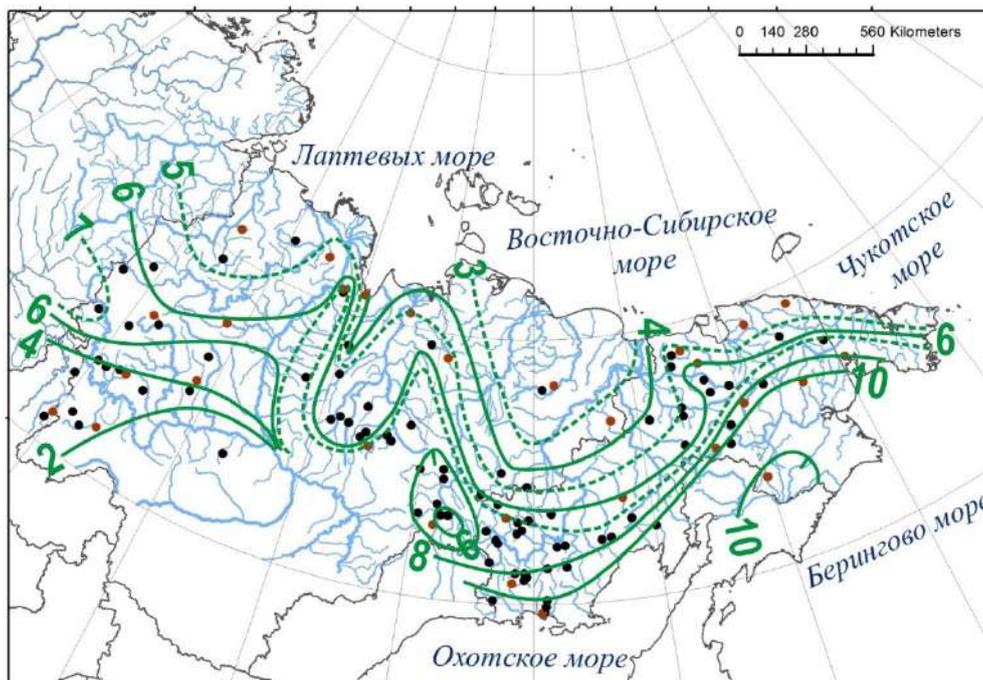


Рис. 1. Карта модуля годового теплового стока ( $\times 10^9$  кДж/км<sup>2</sup>) зональных рек Северо-востока АТР. Точками обозначены центры водосборов рек, замыкаемых гидропостами

Первый метод (№1), довольно простой и приближенный, – по серии региональных зависимостей вида  $W_T = f(W)$ ,  $W_T = f(F)$  и  $W_T = f(H_{cp})$ , актуализированных автором в 2021 г. Среди главных недостатков Метода №1 – пока незнание четких границ районов, в пределах которых эти зависимости следует применять, и увеличение ошибок для рек, сильно удаленных от районов с постами, по данным которых зависимости создавались. Метод №2 – определение годовой величины  $W_T$  как суммы месячных величин. Последние, в свою очередь, рассчитываются по средним месячным расходам и температурам воды. Расходы воды рассчитываются стандартными методами, изложенными в СП 33-101-2003. Температуры воды рекомендуется узнавать несколькими способами: 1) по данным постов на реках-аналогах, 2) по картам среднемесячных температур воды (они автором построены, пример такой карты приведен на рис. 2), 3) в горных районах – по зависимостям  $t = f(H_{cp})$ , которые автором также обоснованы (предварительно выполнено разделение региона на 10 высотно-термических зон), 4) по данным метеонаблюдений за температурой воздуха с использованием региональных переходных коэффициентов – от среднемесячной температуры воздуха к температуре воды. Автором обнаружено, что этим методом мы получаем несколько завышенные величины годового теплового стока – в среднем на 5%.

Метод №3, как основной, – использование карты модуля годового теплового стока. Но более уверенные результаты, как полагает автор, дает реализация нескольких независимых методов. При этом следует помнить, что каждый последующий год необходима проверка адекватности применяемых инструментов на независимом и новом материале. Поскольку перечисленные инструменты создавались на основе среднемесячных расходов и температур воды (из-за их доступности), для повышения точности определяемого годового теплового стока необходимо осуществить переход к величине годового теплового стока  $W_T$  (дек.), отвечающего расчетам по декадным значениям. Для этого предлагаются региональные обобщения пересчетных коэффициентов  $K_{d/m} = W_T(\text{дек.})/W_T(\text{мес.})$  в виде авторских карт. Внутригодовое распределение теплового стока (по месяцам теплого сезона года) можно получить либо Методом №2, либо используя данные рек аналогов.

Расчет  $W_T$  больших рек, текущих на север, на участках ниже замыкающего створа (самого нижнего стокowego поста) и в устье, можно выполнить двумя способами. Первый – это суммирование  $W_T$  на замыкающем створе и притоков, впадающих ниже по течению.  $W_T$  притоков оценивается или по данным постов, либо выше описанными методами.

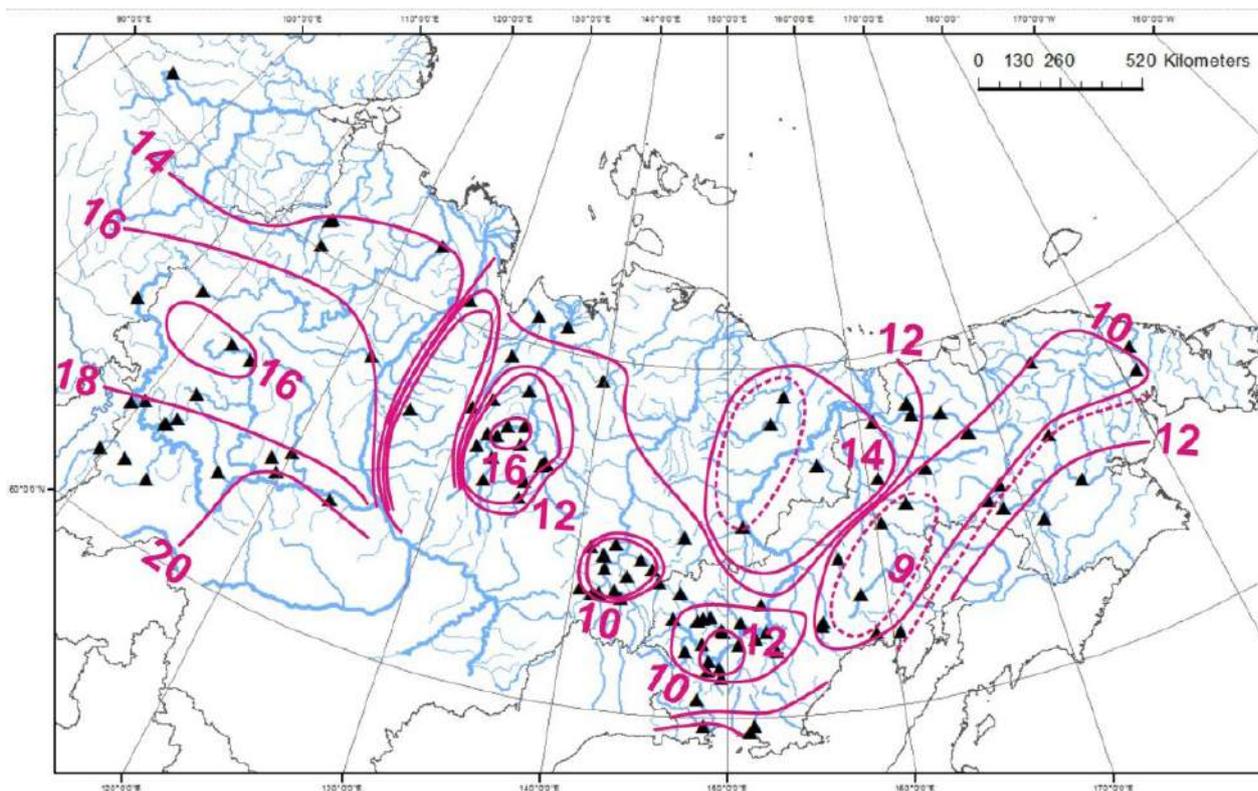


Рис. 2. Средняя температура воды в июле в реках Северо-востока АТР в августе. Карта построена по данным за период с 1955 по 2012 гг.; треугольниками обозначено местоположение гидропостов

Этот подход не совсем корректен, поскольку тепловой сток в северном направлении может уменьшаться из-за снижения температуры воды. И, по сути, мы получаем некую верхнюю границу искомой величины  $W_T$ . Второй способ, более надежный, предполагает расчет  $W_T$  в искомом створе по средним месячным расходам, рассчитанным по СП 33-101-2003, и температурам воды, реально измеренным на самом нижнем уровне поста. Пример его реализации содержится в работе (Куржунов, 1984).

#### Литература

1. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
2. Ёлшин Ю.А. Тепловой сток в моря Северного Ледовитого океана // Водные ресурсы. 1988. № 5. С. 63–68.
3. Иванов В.В., Куржунов А.Н. Тепловой сток рек в Обско-Тазовскую губу // Труды ААНИИ. 1980. Том 358. С. 102–110..
4. Куржунов А.Н. Тепловой сток Енисея в устьевой области // Труды ААНИИ. 1984. Том 394. 1984. С. 66–74.
5. Магрицкий Д.В. Тепловой сток рек в моря Российской Арктики и его изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер.5. География. 2009. №5. С.69–77.
6. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестн. Моск. ун-та. Сер.5. География. 2015. №6. С.85–95.
7. Магрицкий Д.В., Евсеева Л.С., Ретеюм К.Ф. Природные и техногенные факторы изменения теплового стока северных и южных рек России // Гидроэкология: теория и практика. Проблемы гидрологии и гидроэкологии. Вып.2. М.: Изд. Моск. ун-та, 2004. С. 213–237.
8. Методические рекомендации к составлению справочника по водным ресурсам // Термический и ледовый режим рек. Вып. 9. Л.: ГГИ, 1961. С. 16–17.
9. Magritsky D.V., Alexeevsky N.I, Aybulatov D.N., Fofonova V.V., Gorelkin A. Features and evaluations of spatial and temporal changes of water runoff, sediment yield and heat flux in the Lena River delta // Polarforschung. No 87 (2). 2018. pp. 89–110.

## РЕАКЦИЯ СТОКА НАНОСОВ РЕК В БАССЕЙНЕ Р.ЛЕНЫ НА ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И ХОЗЯЙСТВЕННУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Д.В. Магрицкий<sup>1</sup>, Л.С. Банщикова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Географический факультет, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, [magdima@yandex.ru](mailto:magdima@yandex.ru)

<sup>2</sup>ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия, [gu\\_ggi@mail.ru](mailto:gu_ggi@mail.ru)

В статье, на основе новых данных стационарных наблюдений и их всестороннего анализа, показаны особенности многолетних и внутригодовых изменений мутности воды и стока взвешенных наносов в разных частях бассейна Лены, выделены зоны с разными тенденциями. Подробно рассмотрено нарушение режима стока наносов Вилюя водохранилищами и его продольная трансформация.

*Ключевые слова:* мутность воды, сток наносов, многолетние тенденции, водохранилища

In the paper, on the basis of new data from gauges and their comprehensive analysis, the features of long-term and intra-annual changes in water turbidity and suspended sediment runoff in different parts of the Lena River basin are shown, the zones with different trends are indicated. Violation of the regime of sediment runoff of the Vilyuy River by reservoirs and its longitudinal transformation is considered in detail.

*Keywords:* water turbidity, sediment runoff, long-term trends, reservoirs.

Сток наносов – важная составляющая речного стока. Он влияет на характер русловых процессов, существование неустойчивых русел, динамику устьевых конусов выноса и гидрографической сети в дельтах. Регулируя интенсивность русловых деформаций, сток наносов в сочетании с максимальными расходами воды и интенсивным ледоходом влияет на вероятность наводнений, размыв берегов и безопасность хозяйственных объектов на них, устойчивость опор мостов и др. Речные наносы и их активная аккумуляция определяют занесение водозаборов, каналов и судовых ходов, водохранилищ, участвуют в формировании стоимости водоподготовки. Часть загрязняющих веществ перемещается с речными наносами. Экологическая роль речных взвесей также очевидна, и она не всегда позитивная.

Главным источником поступления наносов в реки служит эрозия поверхности водосборов и пойменно-русловых отложений. Поэтому значительное и долговременное изменение его величины и внутригодового режима – свидетельство происходящих в бассейне и его речной сети масштабных процессов, среди которых изменение температурно-влажностных условий и расходов воды, нарушение растительно-почвенного покрова, нарастание горнодобывающей деятельности, строительство водохранилищ. В криолитозоне трансформация стока наносов рек дополнительно связана с деградацией многолетнемерзлых пород, ростом температуры воздуха и воды, интенсификацией процессов термоэрозии. Именно в такой зоне расположен полностью бассейн Лены.

В работе Д.В. Магрицкого (Магрицкий, 2015), посвященной современным гидрологическим условиям в низовьях Лены и Вилюя, сообщается о статистически

значимом увеличении стока наносов р. Лены (по данным поста Кюсюр) – на 5,85 млн т/год в 1988–2010 гг. (по новым уточненным оценкам – на 6,1 млн т/год). Он вырос главным образом за счет летне-осеннего сезона, причем не только по причине роста водности реки, но и мутности. Увеличение концентрации речных взвесей обнаружено главным образом на нижнем участке реки, согласно экспедиционным измерениям 1994 и 2008 гг. (Чаркин и др., 2009; Rachold et al., 1995). Во внутригодовом плане роль весеннего половодья уменьшилась с 82,7% в 1936, 1944, 1960–1987 гг. до 64,8% в 1988–2010 гг., а доля летне-осеннего сезона возросла с 16,8 до 34,9%.

А что же по стоку наносов других рек в бассейне Лены? Ответить на этот вопрос удалось только сейчас в рамках работы по гранту РФФИ № 21-17-00181. Информационной основой послужили данные стационарных наблюдений за стоком воды и наносов (за весь период и вплоть до 2017 г.) на 6 постах на самой р.Лене и в ее дельте, на 8 опорных постах в верховьях Лены и бассейне Алдана, 12 постах на р.Вилюй и его притоках. Правда, не за все годы, попадающие на рубеж XX–XXI вв., удалось добыть данные.

Установлено, что, несмотря на доминирование рек с современным увеличением водного стока (рис. 1, 2), большие по площади участки бассейна Лены показывают статистически значимое снижение стока наносов – до 40–50% (в 2004–2017 гг.) (рис. 3), – именно за счет снижения мутности воды. Они формируют 3 зоны: 2 зоны современного естественного снижения мутности воды в верховьях Лены и в бассейне Вилюя, одну зону естественно-антропогенного снижения (из-за сокращения масштабов горнодобывающей деятельности, начиная с 1990-х гг.) в бассейне Алдана (см. рис. 2).

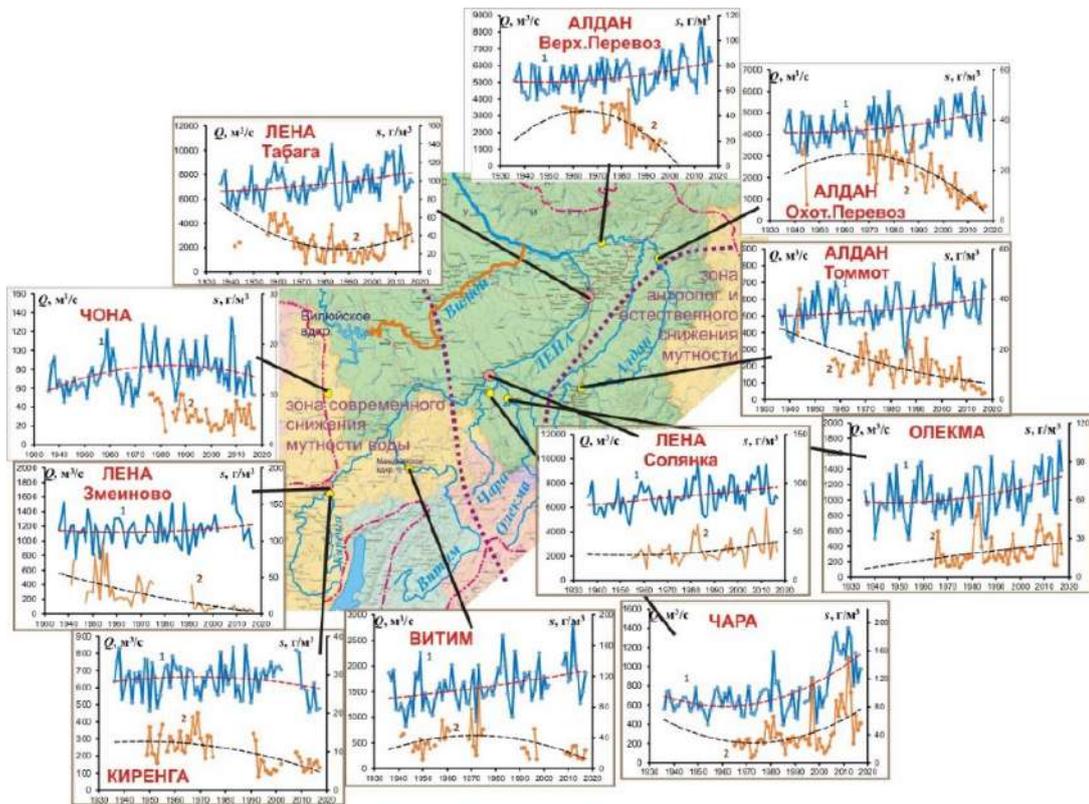


Рис. 1. Многолетние изменения среднегодовых расходов воды (1) и мутности воды (2) на постах в верхней и средней частях бассейна Лены с трендами и указанием зон современных тенденций изменения

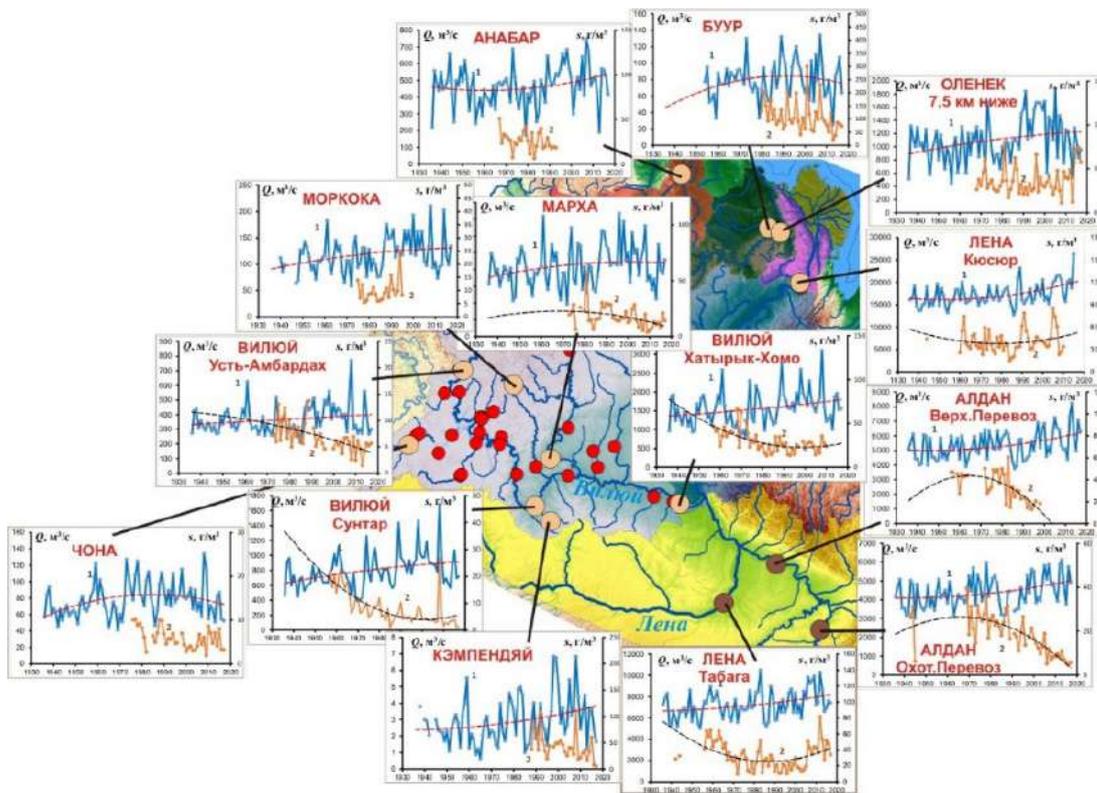


Рис. 2. Многолетние изменения среднегодовых расходов воды (1) и мутности воды (2) на постах в нижней части бассейна Лены (и на соседних водосборах) с трендами и указанием зон современных тенденций изменения

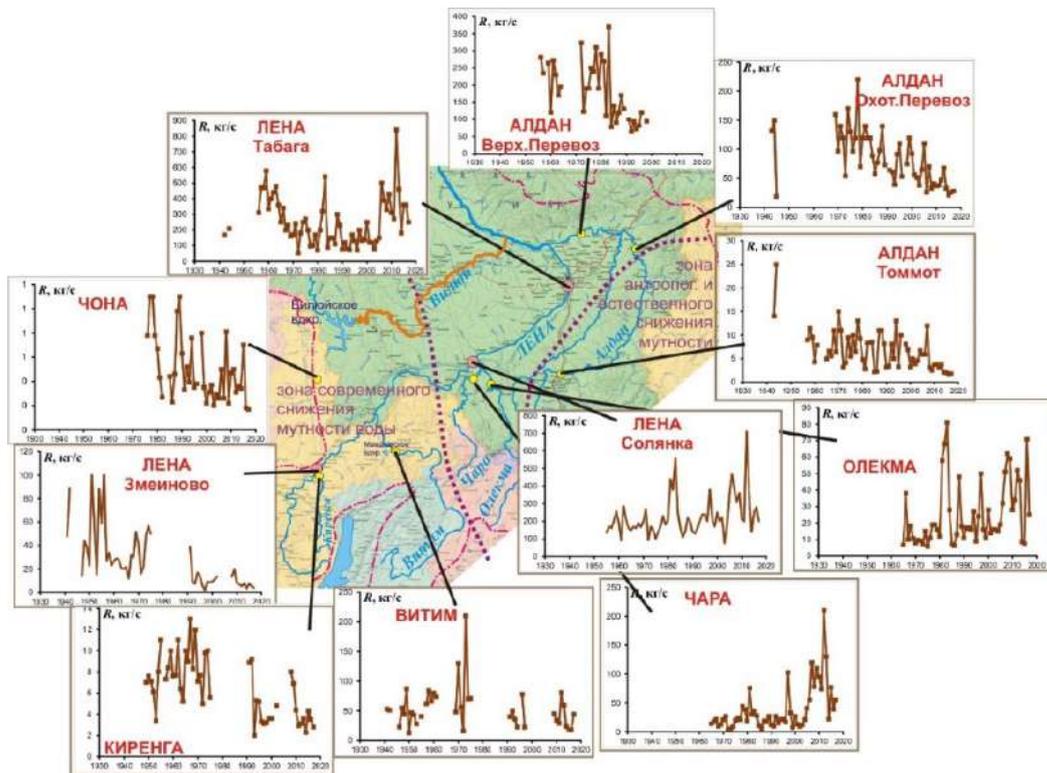


Рис. 3. Многолетние изменения среднегодовых расходов взвешенных наносов в верхней и средней частях бассейна Лены

Тем не менее, снижение стока наносов у многих притоков Лены не мешает самой реке, как ранее отмечено, показывать его значительный рост на постах Солянка, Табага, Кюсюр и в дельте за счет увеличившегося стока наносов притоков ниже по течению от р. Чара), активизации размыва берегов, сложенных ММП. Но нельзя исключать и инструментально-методические нарушения в рядах наблюдений, начиная с 1990-х гг. упадка. Изменился, кроме того, внутригодовой режим стока наносов рек в бассейне Лены (рис. 4), в том числе по причине изменений их водного режима.

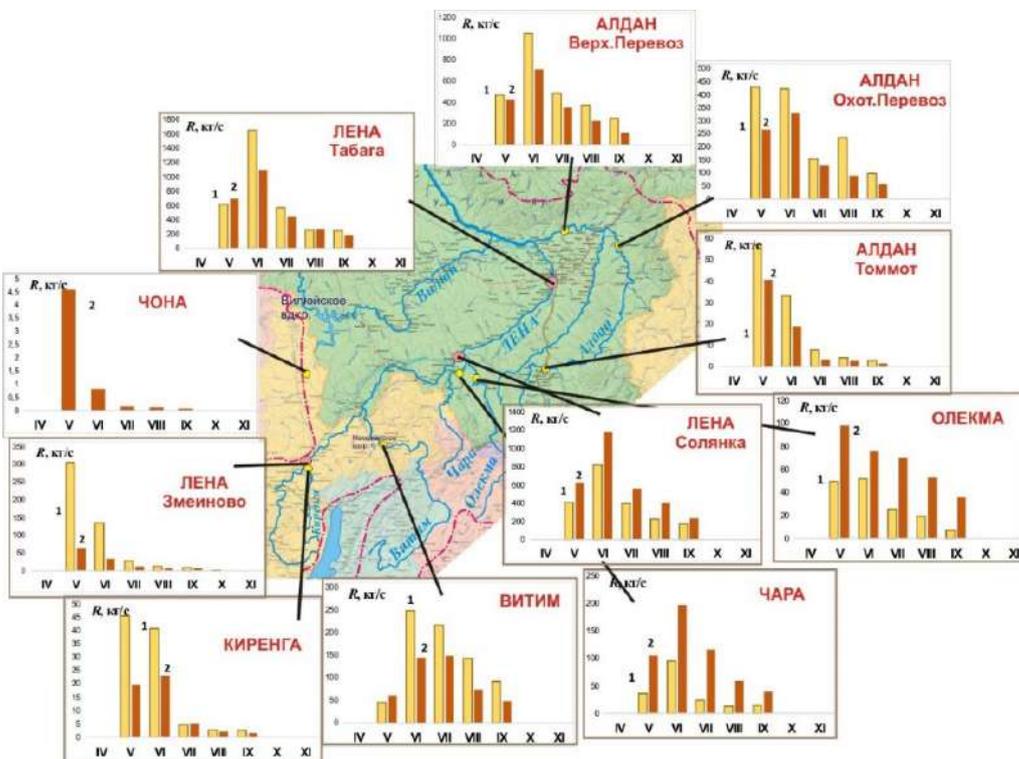


Рис. 4. Внутригодовое распределение средних месячных расходов взвешенных наносов до (1) и после (2) 1977 г. на постах в верхней и средней частях бассейна Лены

Особый случай – река Вилюй, зарегулированная двумя водохранилищами – Вилюйским и Светлинским с 1967/1974 гг. и 2004 г. соответственно. Они значимо сократили сток наносов на среднем и нижнем участках реки. Причем это воздействие испытывает значительную продольную трансформацию. В Вилюйском водохранилище средняя мутность воды ( $s$ ) снижается от верховьев к плотине с 10–15 г/м<sup>3</sup> до исчезающе малых значений. Согласно формуле Б.И. Новикова, полученной им для равнинных водохранилищ России и Украины, долю удерживаемых наносов можно рассчитать через длину ( $L$ ) и коэффициент водообмена ( $K_b$ ):

$$K_{yn} = 99,6 - 2,32 \frac{K_b L}{365} \quad (1)$$

Для Вилюйского водохранилища мы получаем 98%. Это согласуется с фактическими данными. На 175 км ниже плотины ГЭС-1,2, подпирющей Вилюйское водохранилище (оно главное), мутность воды в зарегулированных условиях равна 3 г/м<sup>3</sup> (пост Сюльдюкар). На посту Сунтар мутность уменьшилась с 18 г/м<sup>3</sup> (в 1957–1966 гг.) до 7 г/м<sup>3</sup> (в 1974–2012 гг.), а сток взвесей ( $W_R$ ) – с 490 до 195 тыс. т/год. Причем снижение мутности началось с момента заполнения водохранилища. На посту Хатырык-Хомо (замыкающий створ р.Вилюй) мутность воды составила в эти периоды 39 и 24 г/м<sup>3</sup> соответственно,  $W_R$  – 1950 и 1285 тыс. т/год. Таким образом, хотя и существует вдольрусловое нарастание мутности воды и стока взвешенных наносов, они не достигают прежних значений. Во-вторых, разность между естественной и нарушенной величинами стока наносов к устью Вилюя, наоборот, лишь увеличивается. Это можно объяснить значительным уменьшением максимальных расходов воды (на 40 и 20% на постах Сунтар и Хатырык-Хомо) и соответственно руслоформирующего их потенциала, а также уменьшением водности половодья в целом, и в отдельные летне-осенние месяцы. То есть на сток наносов действует комплекс факторов прямого и косвенного воздействия. С 1988 г. фиксируется небольшой рост стока взвешенных наносов реки, в основном, за счет летне-осеннего сезона. То есть, как и в низовьях Лены. В-третьих, произошло существенное внутригодовое перераспределение стока наносов – доля половодья сократилась с 93 до 86%, доля зимней межени возросла от близких к нулю значений до 3,5%. Как повлиял ввод

Светлинского гидроузла? Обнаружено, что на посту Сунтар уменьшился размах колебаний и есть тенденция к дальнейшему снижению мутности.

И главный вопрос – влияют ли нарушения естественного режима стока наносов Вилюя на величину и режим стока взвешенных наносов нижней Лены, или нет? К сожалению, в силу недостаточности и, главное, надежности исходных данных, особенностей руслового баланса наносов точно оценить этот фактор не представляется возможным. В естественных условиях воды нижнего Вилюя были менее мутные (39 г/м<sup>3</sup>), чем воды средней Лены в 1,4 раза (54 г/м<sup>3</sup>) и выше впадающего Алдана – в 2,4 раза (~94 г/м<sup>3</sup>). Вклад наносов Вилюя в общий сток в узле Лена–Алдан–Вилюй составлял примерно 6,6%, тогда как водный сток ~ 10,5%. Далее наблюдается снижение стока наносов средней Лены и, главное, Алдана. Результат – мутность воды речных потоков Лены, Алдана и Вилюя практически сравнялась до значений 24–28 г/м<sup>3</sup>, доля вилюйских наносов выросла до 10,3%. По очень приближенным оценкам, уменьшение стока наносов Вилюя водохранилищами в значительной мере формирует не очень большое нарастание, или даже некоторое современное снижение стока наносов Лены на посту Кюсюр в половодье (май – июль: Лена – снижение на 0,25 млн т/год с 1960–1986 по 1987–2010 гг., Вилюй – снижение на 0,705 млн т/год с 1957–1966 по 1974–2010 гг.), никак не влияет на сток летне-осенней межени с паводками (+5,37 млн т против +0,005 млн т) и, возможно, немного увеличивает мутность вод и сток наносов зимней межени (+42,5 тыс. т) и загрязнение речного льда.

#### Литература

1. Магрицкий Д.В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // *Вестн. Моск. ун-та. Сер.5. География*. 2015. №6. С.85–95.
2. Чаркин А.Н., Федорова И.В., Семилетов И.П. и др. Масштабы пространственной изменчивости распределения взвеси в системе «Река Лена – море Лаптевых» // *Геология, география и экология океана. Ростов-на-Дону: ЮНЦ*, 2009. С. 351–354.
3. Rachold V., Hermel J., Korotaev V.N. Expedition to the Lena River July/August 1994 // *Berichte zur Polarforschung*. 1995. N 182. pp. 181–195.

## ПОЛЕ АККУМУЛЯЦИИ ЛЕДНИКА ЛЕВЫЙ АКТРУ

К.В. Никитин

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
Allcreator95@gmail.com*

Работа выполнена с использованием научного оборудования  
УНУ «Система экспериментальных баз, расположенных вдоль широтного градиента»  
НИ ТГУ при финансовой поддержке Минобрнауки России (RF----2296.61321X0043, 13.УНУ.21.0005, соглашение № 075-15-2021-672).

Исследуются особенности поля аккумуляции ледника Левый Актру, структурно-текстурные особенности снежно-фирновой толщи и динамика снегонакопления за период исследований.

*Ключевые слова:* аккумуляция, снежно-фирновая толща, динамика, плотность снега.

The features of the field of accumulation of the Levii Aktru glacier, the structural and textural features of the snow-firn strata and the dynamics of snow accumulation during the period of research are investigated.

*Key words:* accumulation, snow-firn strata, dynamics, snow density.

Важной задачей при создании региональной модели баланса массы ледников Алтая является оценка пространственно-временной динамики его основных элементов – аккумуляции и абляции. Изучение аккумуляции является одной из важнейших тем горной гляциологии. Данные о величине аккумуляции позволяют уточнить положение границы питания ледника, долю твердых осадков в итоговом значении баланса массы и долю влияния метелевого переноса и лавин. Полевые исследования позволяют получить наиболее точную информацию о распределении снежного покрова как во времени, так и в пространстве.

Изучение поля аккумуляции ледника Левый Актру, расположенного, преимущественно, в диапазоне высот 2650–3600 м над уровнем моря, было возобновлено в результате совместной экспедиции Томского государственного университета и Института географии РАН в 2019 году (Кутузов и др., 2019) и регулярно выполнялось в период максимальной аккумуляции (максимальные снегозапасы), обычно приходящейся на начало – середину мая. При анализе полученных данных было выявлено, что максимальное снегонакопление приходится на слабонаклонный участок, расположенный в фирновой зоне ледника на высоте 3000–3200 м близ перевала Маашей. Среднегодовые показатели аккумуляции на данном участке превышают 500 см.

В 2019–2020 годах для проведения снегосъемки мы использовали маршрутный способ. На леднике были пройдены продольный снегомерный маршрут и ряд поперечных. В итоге были построены поля аккумуляции ледника. Главным недостатком маршрутного способа являлось то, что на ряде участков ледника снегосъемка не была проведена, в то время как на

других участках точки измерения высоты снежного покрова были в избытке. По рекомендации Всемирной Службы Мониторинга Ледников в 2021 году мы скорректировали способ измерения аккумуляции с маршрутного на площадной и выполнили измерения по равномерной сетке с шагом 100 метров. При значительной площади ледника (более 5 км<sup>2</sup>) работы заняли более двух дней.

Для измерения плотности и структурно-стратиграфических особенностей снежно-фирновой толщи нами был выкопан ряд шурфов. В 2021 году высота шурфа на точке № 12 составила 390 см. Плотность снежного покрова варьировалась от 0,4 до 0,7 г/см<sup>3</sup>. На глубине от 31 до 50 см наблюдались значительные ледниковый прослойки толщиной до 3 см.

Минимальные показания аккумуляции наблюдались на относительно небольшом выположенном участке (3–5°) юго-восточной экспозиции близ водораздела на высоте 3600 м. Значительное выдувание свежеснеговывающего снега является основным фактором минимальных показателей снегонакопления.

Снегосъемка была проведена и на лавинных конусах, находящихся на правом борту ледника. Для проводимых нами работ количественный вклад этих территорий в общую аккумуляцию на Левом Актру еще предстоит изучить.

### Литература

1. Кутузов С.С., Ерофеев А.А., Лаврентьев И.И., Смирнов А.М., Копысов С.Г., Аббасов З.Р., Никитин К.В. Восстановлены наблюдения на ледниках Актру на Алтае // Лёд и Снег. 2019. Вып 59(3). С. 306. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-469>

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЕТРА, ТЕЧЕНИЙ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ

В.Е. Путьрский

*Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия,  
putyrsky1@yandex.ru*

**Введение.** Термодинамические потоки количества движения и энергии в подстилающей поверхности и атмосфере находятся в постоянном разномасштабном взаимодействии. Зональное поглощение солнечной радиации в условиях сезонных изменений и неравномерности распределения суши и моря приводят к формированию основных закономерностей циркуляции атмосферы и океана. Возникающие при этом неоднородности полей гидрометеорологических элементов довольно успешно описываются системами, так называемых, примитивных гидродинамических уравнений. Однако в подсеточной вычислительной области с временными масштабами от часов до суток и с пространственными масштабами от сотен метров до километров современные теоретические описания циркуляции и турбулентности недостаточно полны, а их параметризации не всегда эффективны. Возможно предполагать, что в данном случае они могут быть дополнены с помощью натуральных экспериментов (Марчук, 1974; Краус, 1979; Путьрский, 1990).

**Цель и задачи работы.** Исследование потоков на границе атмосферы, гидросферы и литосферы. При этом изучается структура полей ветра и течения, температуры, солёности, тонкой вертикальной структуры вод и изменчивости турбулентности в прибрежной зоне Балтийского моря с помощью экспериментальных наблюдений.

**Опыты и результаты.** Проведённые эксперименты с флуоресцирующими трассерами позволили получить определённые сведения об особенностях рассеивания примесей по горизонтали и вертикали, структуре течений, порядках коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии и его изменчивости в прибрежном пограничном слое моря. В свою очередь эти сведения дают основание рассуждать о наличии некоторой упорядоченной системы движения вод в зависимости от ветрового воздействия.

Дополнительная информация, собранная в районах прибрежного пограничного слоя, о распределении температуры, солёности, векторах течений на различных горизонтах, характере смешения берегового стока с морскими водами и воздействии ветра позволяет рассмотреть общую картину циркуляции, типичную для периодов наблюдений в летний сезон года. Схема такой циркуляции, описывающая мезомасштабное взаимодействие ветра и течений в прибрежной зоне, изображается графически. Рассматриваемая картина

циркуляции отмечается от района смешения вод, поступающих с береговым стоком, до района прохождения основного вдольберегового потока на границе прибрежного пограничного слоя моря, регистрируемого у восточного побережья Балтики на расстояниях 12 – 30 км от берега.

Как следует из данных наблюдений, в дрейфовом слое моря под влиянием ветра, направленного вдоль побережья, возникает экмановский перенос вод, направленный от берега. Инструментальные измерения показывают, что уже на глубине 5 метров составляющая течения от берега практически перпендикулярна действию ветра. В результате происходит сгон поверхностных вод от побережья в открытую часть моря.

Поднявшиеся на поверхность глубинные воды идвигающиеся в открытую часть моря имеют более низкую температуру, что связывается с появлением инверсий, обнаруженных во время опытов. Это приводит к появлению гидродинамической неустойчивости и к постепенному погружению вод. Затем процесс повторяется по мере охлаждения и прогревания жидкости. Таким образом частицы воды под действием стонного эффекта ветра совершают движение по некоторым орбитам в вертикальной плоскости с поступательным перемещением в направлении дрейфового течения.

Опыты с флуоресцирующими трассерами выявили в прибрежной зоне наличие определённого рода вихревых трубок, по типу циркуляции Ленгмюра. Продольные размеры в них во много раз превосходят поперечные и вертикальные. Завихренность в этих трубках чередуется по знаку. Горизонтальные размеры систем поперечных циркуляций составляют десятки метров, а вертикальные – около 10 метров.

Вертикальные размеры верхнего квазиоднородного слоя моря очевидно находятся в зависимости от глубины проникновения ветрового перемешивания. Если следовать известной методике Россби – Монтгомери, то глубине ветрового перемешивания для широты данного района при ветре  $3 - 5 \text{ м с}^{-1}$  соответствует именно величина 10 метров. Наблюдения на гидрологических станциях также свидетельствуют о верхнем квазиоднородном изотермическом слое примерно такой же глубины. При этом необходимо отметить, что образование квазиоднородного изотермического слоя не исключает наличия в нём тонкой структуры.

**Выводы и гипотезы.** Для акваторий прибрежной зоны, где наиболее ярко проявляется сгонный эффект

ветра, наблюдаемые нами в Балтийском море вихри с горизонтальными осями описываются для ряда районов Мирового океана в отечественной и зарубежной литературе. С другой стороны, по некоторым данным возникновение вихрей с горизонтальными осями связывается с неустойчивостью прибрежных течений, вызванной наличием значительных поперечных градиентов скорости открытого потока. Можно также предположить, что при формировании вдольбереговых потоков помимо эффектов придонного трения на образование поперечных градиентов скорости течения в прибрежном пограничном слое влияет пространственная неоднородность воздействия ветра. С удалением от берега скорость ветра возрастает и, как следствие, увеличивается его роль в турбулентном перемешивании вод.

По современным представлениям вихри с горизонтальными осями отводят тепло из поверхностного слоя в

глубину и, следовательно, могут являться основным механизмом мезомасштабного взаимодействия между морем и атмосферой. Выявление причин дробления вихрей с горизонтальными осями на ряд циркуляционных ячеек и образование струйности течений в устойчиво стратифицированных потоках является сложной научной проблемой, которая ждёт своего дальнейшего изучения.

#### Литература

1. Марчук Г.И. Численное решение задач динамики атмосферы и океана / Гидрометеоздат, Л., 1974. 303 с.
2. Моделирование и прогноз верхних слоёв океана (под редакцией Э.Б. Крауса) / Гидрометеоздат, Л., 1979. 367 с.
3. Путьрский В.Е. Гидрофизические аспекты взаимодействия вод суши. М.: Наука, 1990. 120 с.

УДК 551.345: 551.351

## ОЦЕНКА РЕАКЦИИ ЛЬДИСТЫХ БЕРЕГОВ ВОСТОЧНЫХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПЕРВОЙ ПОЛОВИНЕ XXI В.

С.О. Разумов

*Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия, razum55@mail.ru*

Разработана многофакторная математическая модель, в которой связаны климатические, мерзлотно-геологические, морфологические и динамические характеристики побережья арктических морей. С ее помощью оценены темпы разрушения льдистых берегов на некоторых изученных участках побережья морей Лаптевых и Восточно-Сибирского до 2050 г. по двум сценариям климатических изменений. Согласно результатам прогноза, к середине XXI в. средняя скорость термоабразии льдистых берегов с учетом всех изученных участков составит 8–12 м/год. Темпы разрушения берегов на отдельных участках исследуемого побережья могут достигнуть 18–19 м/год.

*Ключевые слова: климатические изменения, динамика льдистых берегов, многофакторная модель, прогноз*

A multifactorial mathematical model has been developed in which the climatic, permafrost-geological, morphological and dynamic characteristics of the Arctic sea coast are related. With its help, the rates of destruction of icy shores in some studied areas of the coast of the Laptev and East Siberian seas until 2050 were estimated according to two scenarios of climate change. According to the results of the forecast, by the middle of the XXI century, the average rate of thermal abrasion of icy shores, taking into account all the studied areas, will be 8–12 m / year. The rate of coastal destruction in some areas of the studied coast can reach 18–19 m / year.

*Keywords: climate changes, dynamics of icy-rich coasts, multivariate model, forecasting*

В первой половине XXI в. следует ожидать заметные изменения в гидросфере и криолитозоне Арктики, вызванные продолжающимся потеплением климатических условий. Возрастет продолжительность сезона оттаивания, штормовая активность и пространства открытой воды в морях, уменьшится количество морских многолетних льдов. Эти изменения обусловят усиление абразионной активности морей и, следовательно, ускорение темпов разрушения термоабразионных берегов, которые являются наиболее динамичным криогенным объектом и широко распространены на побережье морей Лаптевых и Восточно-Сибирском, занимая около 4 тыс. км береговой линии. Берега

сложены весьма неустойчивым к воздействию моря и климатическим колебаниям ледовым комплексом – неоплейстоценовыми и голоценовыми супесчано-суглинистыми осадками с массивными льдами, содержание которых достигает 60–70% и более. Термоабразия таких берегов является наиболее опасным процессом в отношении инфраструктуры Северного Морского Пути и прибрежных объектов нефте- и газотранспортной систем.

Различными методами исследовано около 5% побережья рассматриваемых морей, причем около половины имеющих в публикациях данных получены с помощью разовых измерений на местности. Недо-

статочная изученность реакции берегов арктических морей на изменения климатических условий, а также необходимость оценки последствий природных катастроф и рисков при строительстве и эксплуатации инженерных объектов на побережье арктических морей определяют теоретическую и практическую значимость математического моделирования динамики морских криогенных берегов.

Особенность динамики исследуемых берегов заключается в зависимости интенсивности береговых криогенных процессов от климатических изменений,

в основном от средней температуры воздуха сезона оттаивания (июнь-сентябрь), ввиду относительно высокого содержания льда в береговых осадках. Для изучения реакции береговых криогенных процессов на изменения климатических условий выполнен корреляционный анализ данных (рис. 1) с оценкой достоверности полученных коэффициентов парной корреляции

( $r$ ) на основе их стандартной ошибки ( $\sigma_r$ ):

$$r/\sigma_r = r \cdot \sqrt{n} / (1 - r^2).$$

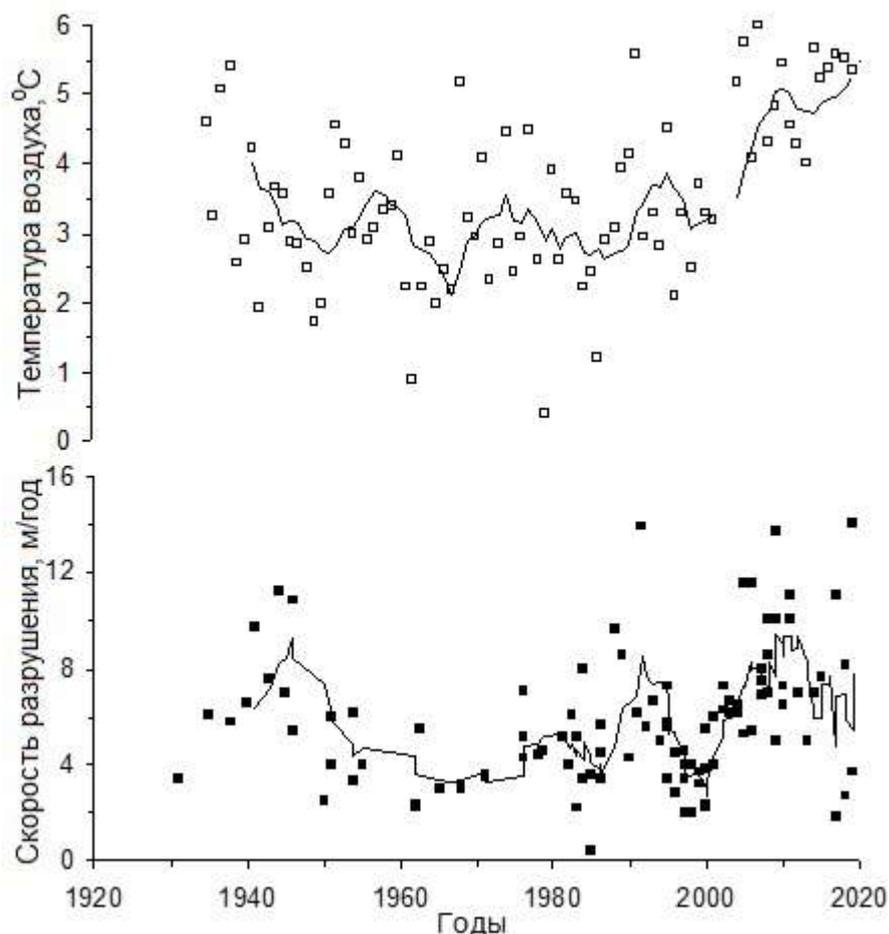


Рис. 1. Изменения температуры воздуха сезона оттаивания на побережье, осредненной по восточной части моря Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского моря (Алексеев и др., 2010; Интернет ресурсы), и средней скорости разрушения ледистых берегов указанных районов (Григорьев и др., 2006; Разумов, Григорьев, 2017; Grigoriev, 2019). Линии – изменения рассматриваемых характеристик, сглаженные по 5-летиям.

Связь является реальной, если  $r/\sigma_r > 3$ . Коэффициент корреляции между средней температурой воздуха сезона оттаивания и средними темпами разрушения берегов составил 0,5 с критерием достоверности 4,37 при количестве парных значений ( $n$ ) 47. Коэффициент корреляции между рассматриваемыми характеристиками, осредненными по временным интервалам, достигает 0,74 (Разумов, Григорьев, 2017) и свидетельствует о солидарных изменениях этих характеристик во времени.

Разработка многофакторной модели динамики ледистых берегов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в нестационарных климатических условиях XXI в. проводилась на основе физико-математической модели (Григорьев и др., 2006). Прогностическая модель сформулирована в виде уравнения:

$$v(t) = 0,89 \cdot 10^{-3} (6,6(\bar{T} + \delta T(t)) - 4,3) \cdot z^{1,36} \cdot p(t) \cdot e^{0,2(\bar{T} + \delta T(t)) - 2L} / h^{0,4} \quad (1)$$

где  $v(t)$  – прогнозируемая скорость разрушения

льדיстых берегов, м/год,  $\bar{T}$  – климатическая норма температуры воздуха сезона оттаивания, °С, определяемая как среднее значение в принятом в климатологии стандартном базовом интервале 1961–1990 гг. (Алексеев и др., 2010),  $\delta T$  – отклонения средней температуры воздуха сезона оттаивания от нормы,  $z$  – средняя глубина моря на линии разгона волн,  $p(t)$  – повторяемость разрушительных штормов, %, которая спрогнозирована на первую половину XXI в. (Григорьев и др., 2006),  $L$  – средняя объемная льдистость слагающих берега осадков, доли ед.,  $h$  – высота береговых уступов, м,  $t$  – годы: 2020, 2025, ..., 2050.

Прогнозирование динамики берегов выполнено для ряда участков побережья с изученными климатическими, мерзлотно-геологическими и морфометрическими характеристиками (рис. 2, табл. 1). При прогнозируемом климатическом потеплении по сценарию №2 в течение первой половины XXI в. средняя продолжительность безледного времени в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском увеличится от 23–29 % до 31–35%. При этом ее межгодовые вариации могут достигать 45% (5 месяцев в году). Повторяемость разрушительных штормов будет изменяться в пределах 3–7%. Многолетние льды полностью исчезнут в указанных морях к 2030–2035 гг.

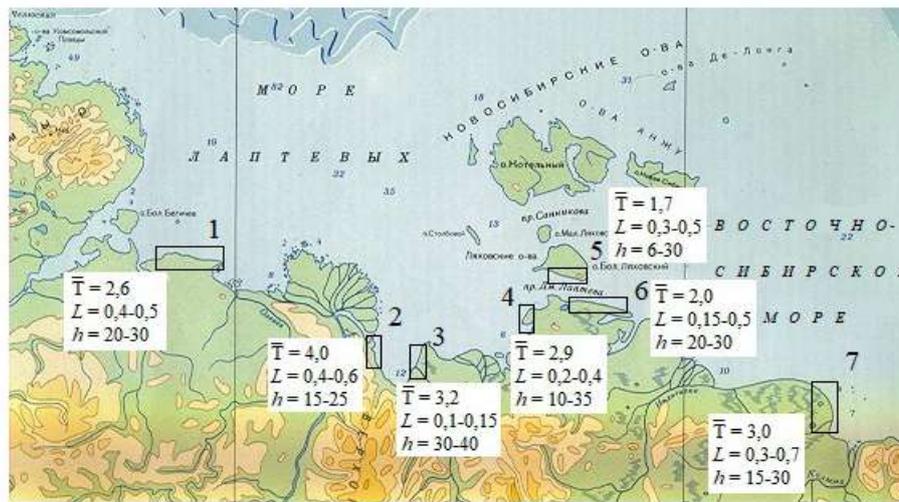


Рис. 2. Участки исследований динамики берегов

Таблица 1. Результаты прогнозирования темпов разрушения льдистых берегов на исследованных локальных участках побережья восточных арктических морей РФ по двум сценариям климатических изменений

Годы	$\delta T$ , °С	$p$ , %	Средняя скорость разрушения берегов, м/год							
			Мыс Мамонтов Клык	Остров Муостах	П-ов Буор-Хая	П-ов Широко-стан	Остров Большой Ляховский	Оягоский Яр	Мыс Крестовский	Среднее
1950-2004	-0,6-1,0	3,0-7,0	2,5-4,4	0,5-6,0	1,7-1,9	3,0-7,0	0,8-7,8	3,8	2,6-5,7	4,0
2005-2019	1,0-1,7	1,1-6,5		3,7-14,0					5,0-11,0	
Прогноз по сценарию климатических изменений №1 (ГГО)										
2020	1,3	5,0	4,2	6,4	2,4	3,3	3,6	2,7	5,1	4,0
2025	1,5	6,1	5,9	8,9	3,3	4,5	5,1	3,9	7,1	5,5
2030	1,7	4,2	4,4	6,6	2,4	3,4	4,0	3,0	5,3	4,2
2035	1,9	4,0	4,6	6,8	2,5	3,6	4,1	3,1	5,5	4,3
2040	2,0	7,0	8,6	12,8	4,8	6,7	8,0	5,9	10,4	8,2
2045	2,2	6,3	8,5	12,4	4,7	6,5	7,9	5,8	10,1	8,0
2050	2,4	3,4	4,9	7,2	2,7	3,8	4,6	3,4	5,9	4,6
Прогноз по сценарию климатических изменений №2										
2020	1,4	5,0	4,2	6,5	2,4	3,3	3,7	2,7	5,2	4,0
2025	1,7	6,1	6,6	9,9	3,7	5,1	5,9	4,4	7,9	6,2

2030	2,1	4,2	5,4	7,9	3,0	4,1	4,9	3,7	6,4	5,0
2035	2,5	4,0	6,1	8,8	3,3	4,7	5,7	4,2	7,3	5,7
2040	2,9	7,0	12,4	17,6	6,6	9,4	11,8	8,5	14,5	11,5
2045	3,2	6,3	13,1	18,7	6,9	9,8	12,8	9,2	15,2	12,2
2050	3,6	3,4	8,0	11,2	4,2	6,0	8,0	5,8	9,3	7,5

Примечание. Сценарий климатических изменений №1 разработан в Главной Геофизической Обсерватории (ГГО), г. Санкт-Петербург [Meleshko et al., 2006]. По этому сценарию коэффициент тренда средней температуры воздуха сезона оттаивания  $0.04\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$ . По сценарию климатических изменений №2 (с учетом полного исчезновения морских многолетних льдов) принимается коэффициент тренда средней температуры воздуха сезона оттаивания в два раза выше, чем по сценарию №1. Данные за 1950–2004 и 2005–2019 гг. приведены в (Григорьев и др., 2006; Алексеев и др., 2010; Разумов, Григорьев, 2017; Grigoriev, 2019; Интернет ресурсы).

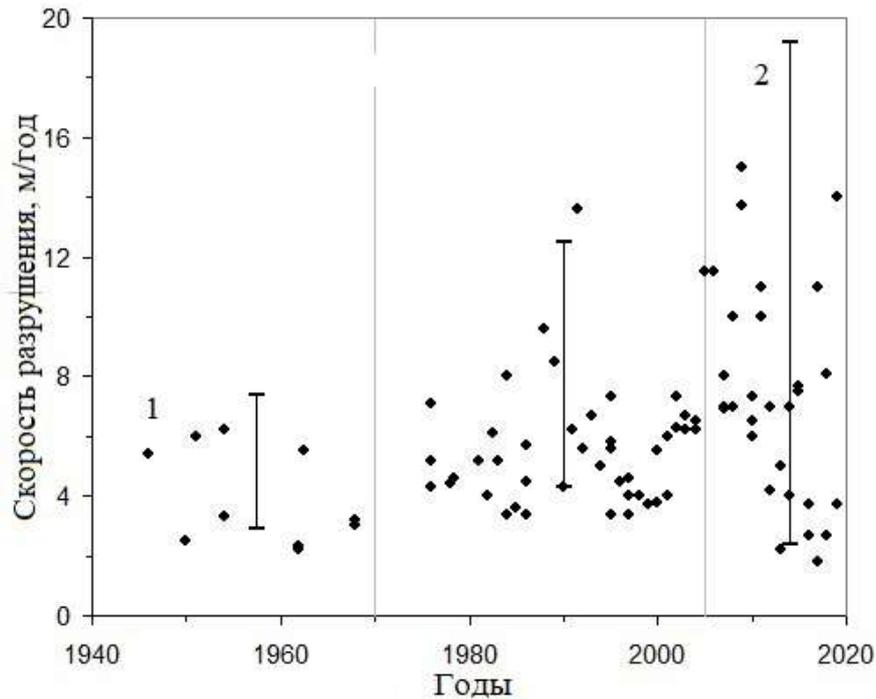


Рис. 3. Измеренные темпы отступания ледистых берегов на исследуемых участках (1) и пределы изменений расчетных скоростей термоабразии берегов (2).

Оценка достоверности уравнения (1) проведена с использованием данных (Разумов, Григорьев, 2017). Результаты расчетов для интервалов 1940–1970, 1970–2005 и 2005–2019 гг. большей частью (70–80%) или полностью попадают в множество фактических данных (рис. 3), что свидетельствует об удовлетворительной достоверности расчетных данных.

Анализ измеренных скоростей термоабразии и их прогнозируемых трендов показывает, что до 2050 г. более вероятно реализация прогноза динамики ледистых берегов по сценарию климатических изменений №2. В соответствии с этим сценарием, осредненная по 7 участкам побережья скорость термоабразии составит 8–12 м/год, а на отдельных участках достигнет 18–19 м/год. Почти все рассматриваемое побережье во второй половине XXI в. попадет в зону высоких рисков освоения Арктики. Наиболее рискованное природопользование в текущем столетии с высокой вероятностью

возникновения чрезвычайных ситуаций предполагается в районах распространения берегов, сложенных ледовым комплексом с ледистостью осадков выше 30%, особенно в восточном секторе моря Лаптевых и западном секторе Восточно-Сибирского моря.

#### Литература

1. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 1 (84). С. 67–80.
2. Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б. Динамика берегов восточных арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 4. С. 74–94.
3. Интернет ресурсы (архив метеоданных): <http://>

- www.pogodaiklimat.ru/history/21825.htm, www.pogodaiklimat.ru/weather.php, [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Бухте\\_Амбарчик](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Бухте_Амбарчик), www.pogodaiklimat.ru/history/25042.
- Разумов С.О., Григорьев М.Н. Моделирование динамики берегов морей Лаптевых и Восточно-Сибирского во второй половине голоцена // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 1. С. 36–45. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(36-45).
  - Grigoriev M. Coastal retreat rates at the Laptev Sea key monitoring sites // PANGAEA. 2019. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.905519>.
  - Meleshko V.P., Kattsov V.M., Shkolnik I.M., Mirvis V.M., Govorkova V.A. Change and variability of climate in northern Eurasia at 21<sup>st</sup> century: evaluation based on AOGCM ensemble // Moscow conference on climate, 2006. Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg, Russia.

УДК 556.561:550.424(571.1)

## МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЙ ТИТАНА В ВОДАХ РЕКИ ОМУТНАЯ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)

О.Г. Савичев, Е.Ю. Пасечник\*, И.П. Адьякса

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия, \*paseyu@yandex.ru*

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-55-80015.

Представлены результаты численного моделирования валовых содержаний титана в водах реки Омутной – элемента системы «река Омутная – река Киргизка – река Томь – река Обь – Карское море». Модель отражает основные природные факторы. Структура модели и результаты расчетов свидетельствуют об увеличении валовых содержаний титана при увеличении твердого и водного стока.

*Ключевые слова: гидрологические условия, математическое моделирование, валовые содержания титана, река Омутная, юго-восток Западной Сибири*

Results of numerical modelling of total Ti contents in waters of the Omutnaya river (an element of system «the Omutnaya river – the Kirgizka river – the Tom river – the Ob river – Kara sea») are submitted. The model reflects the basic natural factors. The structure of the model and results of simulation testify to Ti concentrations increase at river flow rise (water and sediments).

*Keywords: hydrological conditions, mathematical modelling, total contents of the titanium, the Omutnaya river, southeast of the Western Siberia*

### Введение

Понимание механизмов формирования химического состава поверхностных и подземных вод является ключевым моментом в принятии решений в области управления, использования и охраны водных ресурсов. Одним из эффективных способов раскрытия этой проблемы является математическое моделирование гидрохимических процессов. По этой теме в последние десятилетия опубликовано большое количество работ. Тем не менее, роль гидрологических условий в формировании химического состава вод и донных отложений (включая геохимический фон и аномалии) изучена недостаточно полно, что и определило общую цель исследования – математическое моделирование формирования содержаний микроэлементов в речных водах.

### Объект и методика исследования

В качестве объекта исследования выбрана река Омутная (элемент системы «р. Омутная – р. Киргизка – р. Томь – р. Обь – Карское море»), в водосборе которой расположены участки Туганского россыпного узла комплексных руд (ильменит, циркон, рутил, кварцевые пески, каолин) с содержанием минералов тяжелой фракции 2–5 % и мощностью россыпей от 1–2 до 15–20 м (Недра... 2001; Циркон-ильменитовые..., 2001). В 2018–2019 гг.

на р. Омутной автором совместно с В.А. Домаренко и О.Е. Лепокуровой проведен комплекс исследований стока и химического состава речных вод, гранулометрического, химического и минерального состава донных отложений (Savichev, Lepokurova, Domarenko, 2020), на основе результатов которых разработана модель изменения валового содержания в речных водах титана – элемента, входящего в состав рудных минералов (Недра... 2001; Циркон-ильменитовые..., 2001). Определение Ti в речной воде (валовое содержание) и донных отложениях (кислотная вытяжка) 23.06.2018 г., 03.11.2018 г., 10.05.2019 г. выполнено в трех створах на р. Омутной (с. Александровское, ниже с. Александровское. С. Малиновка) с использованием масс-спектрометрического метода с индуктивно связанной плазмой, причем 23.06.2018 г. проведены фильтрация воды через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм и определение форм миграции (фактически две категории: 1) взвешенная и крупно коллоидная; 2) растворенная и мелко коллоидная). Более подробно методика исследования изложена в (Savichev, Lepokurova, Domarenko, 2020).

Рассматриваемая модель изменения валового содержания Ti в речных водах основана на ряде предположений и допущений (Savichev, Guseva, 2020):

$$\frac{d\bar{C}}{dt} = \frac{dC}{dQ} \cdot \frac{dQ}{dt} \approx \frac{dC}{dQ} \cdot k_Q \cdot Q = k_{pf}(C_p - C) + k_s \cdot (S_m - k_c \cdot (S_m - S) \cdot C) = k_z \cdot (C_e - C), \quad (1)$$

$$k_z = k_{pf} + k_s \cdot k_c \cdot (S_m - S), \quad (2)$$

$$k_{pf} = k_p \cdot \Phi^{k_\Phi}, \quad (3)$$

$$S_m = S_{m0} \cdot \text{pH}^{k_{\text{pH}}}, \quad (4)$$

$$C_e = \frac{k_{pf} \cdot C_p + k_s \cdot S}{k_z}, \quad (5)$$

$$C_t = C_e + (C_0 - C_e) \cdot \left(\frac{Q_t}{Q_0}\right)^{-k_z/k_Q}, \quad (6)$$

$$C_p = \exp \exp \left( \sum_i^N \left( K_{oi} - \sum_j^{L_i-1} \ln \ln (\varepsilon_j \cdot \gamma_j \cdot C_j) - \ln \ln (\varepsilon_x \cdot \gamma_x) \right) \right) = C_g = C_0, \quad (7)$$

где  $C_t$  – концентрация вещества в речной воде в момент времени  $t$  при расходе воды  $Q$ ;  $C_p$  – концентрация вещества в условиях равновесия;  $S$  – концентрация вещества в донных отложениях (в кислотной вытяжке);  $C_e$  – решение уравнения (1) при ;  $K_{oi}$  – термодинамическая константа равновесия  $i$ -й реакции ( $i=1, \dots, N$ ), в каждой из которых участвует  $L_j$  ( $j=1, \dots, L_j$ ), включая исследуемое вещество  $x$ ; © и  $\sum$  – коэффициент активности и коэффициент участия в реакции;  $S_m$  – максимальная сорбционная способность донных отложений при pH речной воды;  $k_Q$ ,  $k_{pf}$ ,  $k_p$ ,  $k_\Phi$ ,  $k_{\text{pH}}$ ,  $k_s$ ,  $k_c$ ,  $k_z$ ,  $S_{m0}$  – коэффициенты;  $\Phi$  – фактор влияния внешней среды на отклонение  $C$  от  $C_p$  и релаксацию системы; в случае  $T_i$  в качестве такого фактора использовано содержание взвешенных веществ.

Концентрация  $C_g=6,03$  мкг/дм<sup>3</sup>, величины расходов воды  $Q$  и pH, концентрации  $S$  и взвешенных веществ принята по результатам полевых работ в 2018–2019 гг. (Savichev, Lepokurova, Domarenko, 2020). Прочие параметры приняты по результатам оптимизации с использованием MS Excel (инструмент «Поиск решения», метод общего понижающего градиента) для минимума функции:

$$K_s = \frac{s}{\sigma_m} = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N (y_m - \bar{y}_s)^2}{N_m \cdot \sigma_m^2}}, \quad (8)$$

где  $\int_m$  – среднее квадратическое отклонение величины  $y$  (концентрация  $C$ ); индексы  $m$  и  $s$  соответствуют измеренным и расчетным значениям  $y$ ;  $N_m$  – объем выборки измеренных значений.

Таблица 1. Характеристики и параметры модели (1–7) изменения валовых содержаний  $T_i$  в водах р. Омутной в 2018 – 2019 гг. при  $C_p=C_0=6.03$  мкг/дм<sup>3</sup>

Пункт	выше с. Александровское, 10 м ниже моста			ниже с. Александровское, 100 м выше моста			с. Малиновка, ул. Пролетарская - Элеваторная		
	23.06	03.11	09.05	23.06	03.11	09.05	23.06	03.11	09.05
Дата отбора	23.06	03.11	09.05	23.06	03.11	09.05	23.06	03.11	09.05
Номер пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$M_Q$ , л/(скм <sup>2</sup> )	2.19	0.50	16.73	1.73	0.40	13.18	2.20	0.42	31.64
$C_{ss}$ , мг/дм <sup>3</sup>	22.800	24.280	83.300	55.900	26.780	63.300	46.500	29.530	76.900
$T_w$ , °C	16.4	0.1	6.8	15.9	0.1	6.9	18.2	0.1	7.9

## Результаты исследования

Апробация модели (1–7) в целом показала возможность ее использования для моделирования концентраций в речных водах (табл. 1, рис.1; ). Также было выполнено дополнительное расширение модели на суточный гидрограф р. Омутной в 2018–2019 гг. при допущении, что изменение модулей водного стока р. Омутной пропорционально изменению соотношению измеренных значений (модуля водного стока у с. Малиновка) и среднееголетних значений модуля водного стока р. Киргизки у п. Кузовлево (рис. 2).

Содержание взвешенных веществ и pH речной воды вычислено по зависимости от модуля водного стока. При этом необходимо отметить, что изменение взвешенных веществ прямо пропорционально разнице между максимальной и средней глубиной в расчетном створе вследствие связей между твердым стоком и потерей полной энергии потока. Последняя величина как раз и соответствует разнице между максимальной и средней скоростью потока, что, с учетом уравнения Шези, и соответствует разнице между максимальной и средней глубинами.

Таким образом, по результатам моделирования очевидно, что концентрации веществ, в значительной степени связанные с миграцией в виде взвешенной формы, увеличиваются во время половодья и паводков и уменьшаются в межень. Но при этом необходимо учесть изменение соотношения растворенной (растворенной и коллоидной) и взвешенной (взвешенной и коллоидной) форм (Savichev, Lepokurova, Domarenko, 2020).

pH, ед. pH	8.04	7.04	6.92	8.06	7.87	6.86	7.84	7.67	6.98
$Q_t / Q_a$	0.349	0.080	2.667	0.275	0.065	2.101	0.350	0.067	5.043
$C(Ti)_{изм.}, \text{мкг/дм}^3$	3.31	0.95	59.00	8.75	0.90	59.40	1.75	1.00	69.40
$S(Ti)_{изм.}, \text{мг/кг}$	3.21	8.10	25.80	4.36	7.36	33.23	1.73	14.83	40.21
$S_m$	288.96	276.24	274.64	289.21	286.88	273.83	286.51	284.39	275.44
$C_e$	6.20	5.53	46.67	4.37	5.50	106.03	20.06	3.11	86.64
$-k_z/k_Q$	31.609	25.503	-1.862	-0.811	17.818	-1.021	0.749	12.395	-1.573
$C(Ti)_{расч.}, \text{мкг/дм}^3$	6.20	5.53	40.13	9.08	5.50	59.18	13.67	3.11	80.31
$k_{pf} \cdot 10^{-4}$	-7.42	-6.07	-0.12	-0.42	-4.43	-0.28	-0.76	-3.24	-0.15

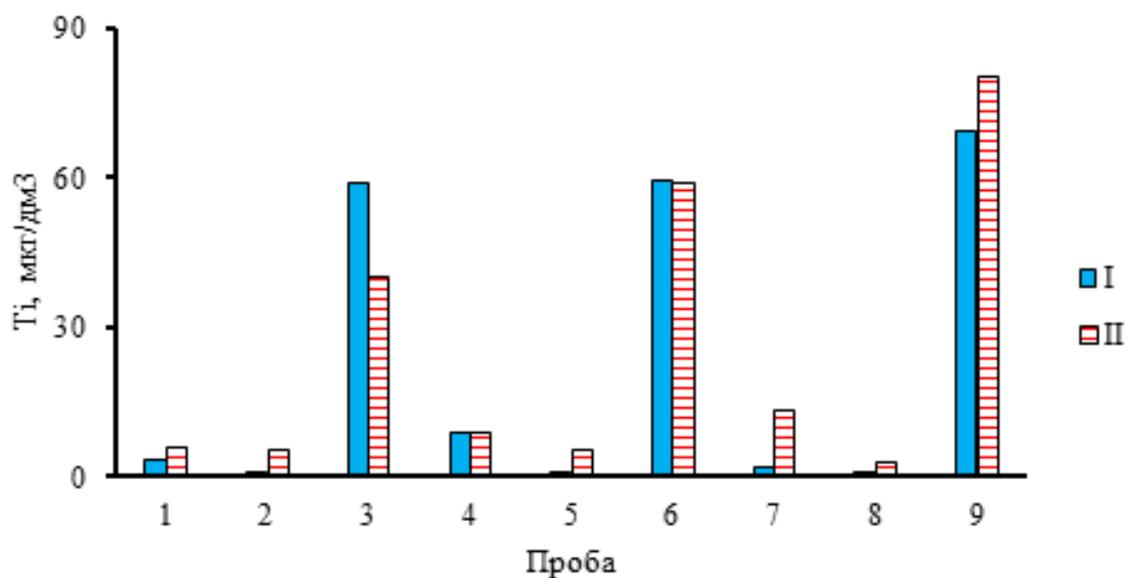


Рис. 1. Измеренные (I) и расчетные (II) валовые содержания Ti в водах р. Омутной (номер пробы по табл. 1)

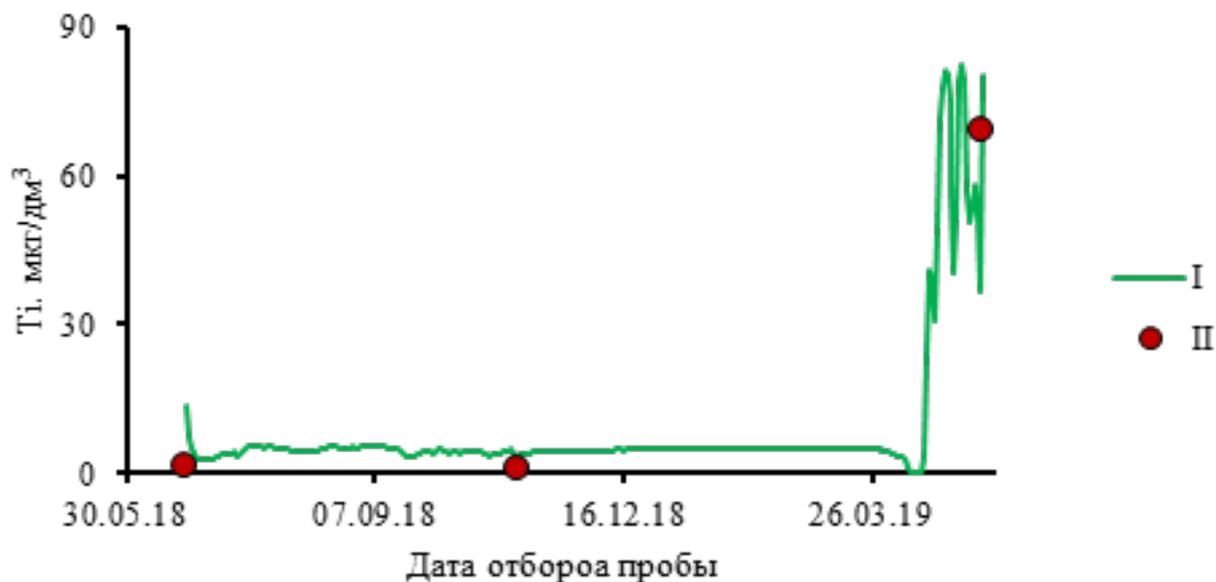


Рис. 2. Изменение валовых содержаний Ti в водах р. Омутной у с. Малиновка в 2018–2019 гг.

## Заключение

Ранее авторами совместно с В.А. Домаренко и О.Е. Лепокуровой (Savichev, Lepokurova, Domarenko, 2020) было отмечено, что внутригодовые изменения состава вод реки Омутной характеризуются: 1) ростом взвешенной формы миграции веществ при увеличении общего содержания взвешенных частиц и твердого стока; 2) увеличением от весеннего половодья до зимней межени содержания веществ с преимущественно растворенной формой миграции (Ca, Mg, Na, K, Cl, S) и максимумами веществ с преобладанием взвешенной формы миграции (Fe, Y, La, Ce) весной. Для содержания Ti отмечено разное соотношение растворенной и взвешенной форм по длине (Savichev, Lepokurova, Domarenko, 2020). Но в рассматриваемом створе у с. Малиновки в целом выявлено существенное преобладание взвешенной формы, что совпадает с указанными выше общими тенденциями и определяет особенности используемой модели, в частности, использование в уравнении (3) содержания взвешенных веществ.

Содержание и состав взвешенных веществ влияет на площадь, время и характер взаимодействий в системе «вода – порода». В частности, в случае р. Омутной у с. Малиновки эти факторы способствуют аккумуляции титана на участках с наименьшей интенсивностью водообмена и усилению выноса с возрастанием водно-

го стока. С учетом этого можно предположить, что наибольшие концентрации этого элемента более вероятны при относительно устойчивом (в геологическом отношении) снижении интенсивности водообмена.

## Литература

1. Недра России. В 2 т. Т. 1. Полезные ископаемые / под ред. Н.В. Межеловского, А.А. Смыслова. СПб.; М.: Горный ин-т, Межрегион. центр по геол. картографии, 2001. 547 с.
2. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / под ред. Е.Н. Трибунского, М.С. Паровинчака. Кемерово: ООО «Сарс», 2001. 214 с.
3. Savichev O.G., Domarenko V.A., Lepokurova O.L. Spatiotemporal changes in river waters and bottom sediments composition within the Tugan placer deposit (Tomsk oblast) // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya, 2020, (5), pp. 715–727. DOI: 10.31857/S2587556620050143.
4. Савичев О.Г., Гусева Н.В. Методология управления геохимическим балансом водосборов на территории Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 5. 28–45. DOI 10.18799/24131830/2020/5/2634.

УДК 551.435.1; 551.435.5

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА ТЕРМОЭРОЗОННЫХ ПРОЦЕССОВ НА СЕВЕРЕ ЯКУТИИ

А.М. Тарбеева<sup>1</sup>, В.С. Ефремов<sup>2</sup>, Л.С. Лебедева<sup>2</sup>, В.В. Шамова<sup>2,3</sup>,  
А.А. Куть<sup>2</sup>, Я.В. Тихонравова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия [amtarbeeva@yandex.ru](mailto:amtarbeeva@yandex.ru)

<sup>2</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

<sup>3</sup>Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, Владивосток, Россия

Полевые работы выполнены при поддержке РФФИ: проекты №20-05-00840 (А.М. Тарбеева), № 18-05-70091 (А.А. Куть, Я.В. Тихонравова), РФФИ № 20-35-70027 (Л.С. Лебедева, В.С. Ефремов, В.В. Шамова). Методические исследования проведены в рамках ГЗ № 121051100166-4 МГУ и ГЗ № АААА-А20-120111690008-9 ИМЗ СО РАН.

В 2019 г. в устьевом районе р. Лены и в окрестностях пос. Тикси начаты наблюдения за динамикой 15 малых термоэрозийных форм. Ключевые участки исследования охватывают естественные и антропогенно измененные ландшафты с разнообразными геоморфологическими и мерзлотно-литологическими условиями, определяющими различные темпы динамики термоэрозийных форм. Предварительный анализ метеорологических условий за годы наблюдений показывает, что в образовании рытвин и динамике вершин оврагов в высокольдистых отложениях решающую роль играют не осадки, а температурные условия.

*Ключевые слова:* термоэрозия, овраги, рытвины, многолетняя мерзлота, климатические изменения, Арктика

Fieldwork was carried out with the support of the RFBR: projects No. 20-05-00840 (A.M. Tarbeeva), No. 18-05-70091 (A.A. Kut, Ya.V. Tikhonravova), RFBR No. 20-35-70027 (L. S. Lebedeva, V. S. Efremov, V. V. Shamov). Methodological studies were carried out within the framework of State Task No. 121051100166-4 Moscow State University and State Task No. ААААА 20-120111690008-9 IMZ SB RAS.

In 2019, observations of the dynamics of 15 thermoerosional forms were started in the Lena Delta region and Tiksi area. The key areas of research are natural and disturbed landscapes with different geomorphology, cryology and lithology, which determine different rates of dynamics of thermoerosional forms. A preliminary analysis of weather monitoring data over the years of our observations proves that temperature conditions, not atmospheric precipitation, play a decisive role in the formation of rills and the dynamics of the gully heads in ice-rich permafrost.

*Keywords: thermal erosion, gullies, rills, permafrost, climate change, Arctic*

Интенсивные климатические изменения в Арктике приводят к активизации многих экзогенных процессов, приводящих к изменению рельефа, состава и объема выносимых веществ, создающих угрозу инженерным сооружениям. Одним из таких процессов является термоэрозия – размыв мерзлых пород под действием механической и тепловой составляющих деятельности водного потока (Термоэрозия..., 1982). Еще несколько десятилетий назад термоэрозия была очень ограничено развита в естественных условиях тундры (Эрозионные процессы..., 1999), но приобретает всё большие масштабы в условиях современных климатических изменений (Bowden, Gooseff et al., 2008; Gooseff, Balser et al., 2009; Godin et al., 2014).

В 2019 г. были начаты исследования динамики малых термоэрозионных форм – оврагов и рытвин – в устьевом районе р. Лены, а в 2020 г. – в окрестностях пос. Тикси. Первые наблюдения были проведены при помощи повторных тахеометрических съемок и прямых измерений рулеткой. В 2020–2021 гг. стала применяться съемка с квадрокоптера DJI Mavic mini, которая в результате фотограмметрической обработки перекрывающихся снимков позволяет получить ортофотопланы и цифровые модели местности, что дает возможность более детально и менее трудозатратно оценить динамику термоэрозионных форм.

Всего к концу полевого сезона 2021 г. получены съемки 15 термоэрозионных форм, на шести из которых имеются повторные наблюдения (табл.). Кроме мониторинга динамики форм рельефа, проводились измерения расходов воды, взвешенных наносов, производился отбор проб воды на химические анализы, изучался состав, естественная влажность и строение размываемых отложений. Вблизи исследуемых объектов расположены государственные метеостанции им. Ю.А. Хабарова (о. Столб) и Тикси, а на о. Самойловском в дельте р. Лены с 2002 года работает автоматическая метеостанция российско-германской экспедиции и проводятся наблюдения за динамикой деятельного слоя по программе CALM (Voike et al., 2019). Такой набор наблюдений позволяет делать предварительные выводы о темпах, причинах и механизмах развития современных термоэрозионных процессов на Севере Якутии. Детальная обработка полученных данных и дальнейшие наблюдения позволят существенно уточнить полученные выводы, которые, возможно, послужат основой соответствующих прогнозов.

Исследуемые термоэрозионные формы расположены на трех ключевых участках (табл.), различающихся по геоморфологическим условиям. Ключевой участок «Хабарово» (рядом с метеостанцией им. Ю.А. Хабарова)

ва) расположен в материковой части суши в устьевом районе р. Лены на отрогах Хараулахского хребта. Рельеф представлен невысокими сопками (с отметками до 171 м н.у.м.), нижние части склонов которых сложены алевритистыми суглинками и вмещают полигонально-жильные льды. Ключевой участок вблизи пос. Тикси расположен на склоне г. Лялькина, также имеющем рыхлый склоновый чехол с мощными ледяными жилами. Ключевой участок «Курунгнах» расположен в дельте р. Лены на одноименном острове, сложенном позднеплейстоценовыми отложениями ледового комплекса и подстилающей песчаной пачкой (Григорьев, 1993). Участки «Хабарово» и «Курунгнах» находятся в пределах Усть-Ленского природного заповедника – территории, защищенной от хозяйственной деятельности в течение последних 35 лет. Овраг в пос. Тикси частично инициирован проложенным в 50 м выше него зимником.

Исследуемые термоэрозионные формы можно отнести к двум типам: овраги и рытвины (промоины) (Тимофеев, 1981). Рытвины – недавно возникшие небольшие (глубиной менее 1–1,5 м) термоэрозионные формы, которые быстро развиваются и могут быть быстро заполнены наносами, но могут и перерасти в овраг. Овраги – более крупные и устойчиво существующие формы, имеют глубину более 1–1,5 м, как правило, существуют более длительное время.

За время наблюдений произошло возникновение трех рытвин и одного оврага – это наиболее динамичные формы. Две из этих форм появились в 2020 и две – в 2021 году.

Наблюдаемые рытвины возникли в нижних частях склонов пологих сопки вдоль склоновых ложбин стока, являющихся местами концентрации склоновых вод. Такая приуроченность рытвин отмечается и другими авторами (Bowden et al., 2008). Ведущую роль в возникновении рытвин играет тепловая составляющая водного потока. Рытвины возникают благодаря развитию подземных каналов, образующихся при вытаивании подземных льдов, в результате последующего обрушения кровли тоннелей. В бортах свежесформированных рытвин вскрывается лед. Характерной особенностью рытвин является образование конуса выноса свежих наносов в долинах принимающих ручьев. Несмотря на малые размеры, рытвины можно отнести к наиболее динамичным формам рельефа, так как они возникают в течение одного теплого сезона и быстро заполняются наносами, утрачивая свежий облик. Развитие рытвин на участке «Хабарово» ограничено близким (1–1,5 м) залеганием коренных алевролитов, замедляющих глубинную эрозию.

Таблица. Список наблюдаемых термоэрозионных форм и время проведения измерений

№	Название	Координаты, с.ш. в.д. WGS 1984	Август 2019	Сентябрь 2020	Июль 2021	Сентябрь 2021
Ключевой участок «Хабарово»						
1	Метеорологический овраг	72°23'40» 126°49'10»	+	+	+	
2	Левый Метеорологический овраг	72°23'46» 126°49'00»	+	+	+	
3	Нескучный	72°23'22» 126°49'52»	+	+		
4	Рытвина №1	72°23'32» 126°51'27»		+	+	+
5	Рытвина №2	72°23'49» 126°51'05»				+
6	Рытвина Арбузная	72°23'58» 126°49'04»				+
Ключевой участок «Курунгнах»						
7	Овраг №2 левый	72°20'02» 126°16'40»				+
8	Овраг №2 правый	72°19'54» 126°16'40»				+
9	Овраг №3	72°19'18» 126°15'44»			+	
10	Овраг №4	72°19'39» 126°16'15»			+	+
11	Активный Левый	72°22'27» 126°14'18»				+
12	Активный Правый	72°22'18» 126°14'24»				+
13	Рытвина Левая	72°19'43» 126°02'28»			+	
14	Рытвина Правая	72°19'44,9724» 126°02'03,5711»			+	
Ключевой участок «Тикси»						
15	Овраг в Тикси	71°37'54» 128°52'43»			+	+

Наблюдения на рытвине №1 (табл.) показали, что через год она заполнилась наносами. Рытвины Левая и Правая (табл.), приуроченные к склонам долины р. Даркет на о. Курунгнах, очень специфичны, так как возникли и существуют благодаря спуску пойменных вод р. Лены, ежегодно затапливающих эту долину.

Овраг вблизи пос. Тикси также возник как рытвина в теплый период 2020 г., однако наличие мощных полигонально-жильных льдов видимой мощностью 4,3 м, а также более глубокое залегание коренных пород (около 4,6 м), позволило рытвине быстро углубиться и развиться в овраг. Образованию рытвины предшествовало развитие термоэрозионных тоннелей и колодцев в ледяных жилах. К сентябрю 2021 года сформировавшийся овраг достиг длины 50,5 м и ширины 14 м. Глубина оврага на начальном этапе образования достигла

4,6 м, но к сентябрю 2021 г. уменьшилась до 3,8 м за счет аккумуляции в днище обрушенных бортов оврага.

Овраги ключевого участка «Хабарово» приурочены к истокам ручьев и малых рек. Отсутствие мощных ледяных включений и близкое залегание коренных пород приводит к тому, что динамика их невелика. Максимальные скорости отступания бровки наблюдались на овраге Метеорологическом в 2019-2020 гг. и достигали 1,6 м/год. Динамика других оврагов этого участка существенно ниже. Большой вклад в развитие оврагов, ориентированных на восток, вносит медленное стаивание здесь сезонных снежников, которые препятствуют размыву днища, но разжижают грунт, приводя к медленному сползанию материала бортов оврага.

Овраги №2, №3 и №4 о. Курунгнах образуются на подмываемом р. Леной уступе третьей террасы.

Постоянное увеличение уклонов, удаление наносов из устья за счет размыва уступа р. Леной и сезонные изменения базиса эрозии за счет динамики уровней воды этой реки способствуют активному развитию оврагов. В вершинах овраги растут аналогично рытвинам, образуя тоннели и промоины в мощных полигонально-жильных льдах. Значительную роль играет отступление склонов оврагов за счет образования термоцирков под действием инсоляции и теплового воздействия воздуха на оголенные борта, сложенные чистым льдом, а также оползания деятельного слоя. Повторные наблюдения, проведенные в июле и сентябре 2021 г., показали, что вершина Оврага №4 за два теплых месяца регрессивно отступила на 14 м, при этом за счет оползания склонов в средней части оврага его бровки на значительном протяжении отступили на 10 и более метров. Сравнение разновременных космических снимков показывает, что в разные годы периодически активизировались вершины разных оврагов. Причины этого пока не установлены.

Левый и Правый Активные овраги на о. Курунгнах расположены в истоках малой реки и не подвержены изменению колебаний уровня воды р. Лены, хотя их оголенные борта несут признаки динамики. Данные повторных съемок по ним пока отсутствуют.

Таким образом, наибольшие темпы динамики имеют овраги, формирующиеся в высокольдистых отложениях ледового комплекса на подмываемом уступе террасы в дельте р. Лены и в районе пос. Тикси. Линейный прирост этих оврагов достигает первых десятков метров в год, а потоки воды в этих оврагах летом имеют мутность около 500-700 мг/л. Также высокими темпами динамики обладают рытвины, формирующиеся за один теплый сезон вдоль склоновых ложбин стока в нижних частях склонов сопки. За 2 года наблюдений образовались 4 рытвины, одна из которых через год утратила свежий облик, а другая (у пос. Тикси) развилась в овраг.

Предварительный анализ метеорологических данных показывает, что возникновение рытвин в 2020 и 2021 г. не было связано с аномальным выпадением ат-

мосферных осадков, а приурочено к годам с высокими среднегодовыми температурами воздуха, что позволяет предположить, что в условиях высокой льдистости отложений основную роль в развитии термоэрозии может играть глубина сезонного протаивания и тепловая составляющая водного потока.

### Литература

1. Григорьев М.Н. Криоморфогенез устьевой области долины р. Лены. Якутск: ИМЗ СО РАН. 1993. 176 с.
2. Термоэрозия дисперсных пород. / Е.Д. Ершов. М.: Изд-во МГУ. 1982. 194 с.
3. Тимофеев Д.А. Терминология флювиальной геоморфологии. М.: Наука. 1981. 268 с.
4. Эрозионные процессы Центрального Ямала / А.Ю. Сидорчук, А.В. Баранов. СПб: РНИИ культурного и природного наследия. 1999. 350 с.
5. Boike J., Nitzbon J., Anders K., et al. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River Delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote sensing data and land surface, snow, and permafrost models // *Earth System Science Data*. 2019. V. 11, pp. 261–299. <https://doi.org/10.5194/essd-11-261-2019>
6. Bowden W.B., Gooseff M.N., Balser A., Green A., Peterson B. J., Bradford J. Sediment and nutrient delivery from thermokarst features in the foothills of the North Slope, Alaska: Potential impacts on headwater stream ecosystems // *Journal of Geophysical Research*. 2008. V. 113. G02026. doi:10.1029/2007JG000470.
7. Godin E., Fortier D., Coulombe S. Effects of thermo-erosion gullying on hydrologic flow networks, discharge and soil loss // *Environmental Research Letters*. 2014. V. 9. 105010 (10pp) <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105010>
8. Gooseff M. N., Balser A., Bowden W. B., Jones J. B. Effects of hillslope thermokarst in northern Alaska // *Eos. AGU*. 2009. Vol. 90. N 4. pp. 29–30.

## ЛЕДОВЫЙ КОМПЛЕКС – К ВОПРОСУ ОБ УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОИСХОЖДЕНИИ

В.Е. Тумской

*<sup>1</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия  
vtumskoy@gmail.com*

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 21-17-00054).

Рассмотрен вопрос происхождения плейстоценовых высокольдистых отложений с мощными повторно-жильными льдами - ледового комплекса. Формирование различных типов льда, жильного и сегрегационного, значительно модифицирует осадконакопление в криолитозоне. Рассмотрены две основные особенности аккумуляции осадков – развитие полигонального микрорельефа и их распучивание. Показана их роль в проблеме происхождения отложений ледового комплекса и его картировании.

*Ключевые слова: Ледовый комплекс, генетический тип, повторно-жильный лед, полигональный микрорельеф.*

The question of the origin of the Pleistocene high ice-rich deposits with thick ice wedges – Ice Complex - is considered. The formation of various types of ice, wedge and segregation, significantly modifies sedimentation in the permafrost zone. Two main features of sediment accumulation are considered - the development of a polygonal microrelief and their frost heaving. Their role in the problem of the origin of the Ice Complex deposits and its mapping is shown.

*Keywords: Ice Complex, genesis of deposits, ice wedges, ice-wedge polygons.*

Ледовый комплекс (ЛК) – специфический тип синкриогенных высокольдистых дисперсных отложений, широко распространенных в Восточной Сибири и на Северо-Востоке России, а также на Аляске и в Канаде. ЛК обычно рассматривается как самостоятельная геологическая толща, характерной особенностью которого является присутствие сингенетических повторно-жильных льдов (ПЖЛ) и часто (хотя и не всегда) – высокая объёмная льдистость вмещающих их отложений за счет текстурообразующих сегрегационных льдов (Романовский, 1993). Состав отложений в разных местах зависит от рельефа и подстилающих пород и может изменяться от почти чистых алевритов до песчано-гравийных и щебнистых отложений, во многих случаях они содержат значительное количество органического вещества, включая линзы торфа (Schirmeister et al., 2011). К ЛК относят только те отложения, которые образовались в холодные климатические эпохи неоплейстоцена, хотя в суровых геокриологических условиях аналогичные по криогенному строению толщи формировались во время эпох потеплений; накапливаются они и сейчас.

Одной из основных проблем изучения отложений ЛК является вопрос их происхождения, который на протяжении полутора веков решается разными исследователями по-разному. Согласно геологическим основам, генезис четвертичных отложений определяется одним конкретным агентом транспортировки, в результате которого формируется набор залегающих вместе осадочных пород (Астахов, 2020). Практически установление генезиса четвертичных отложений основано на изучении условий их залегания, строения и состава.

Накопление отложений ЛК – не просто разновидность аккумуляции осадков в пределах криолитозоны. Она имеет два принципиальных отличия.

Первое отличие – осадконакопление происходит на поверхности полигонального микрорельефа, существование, морфология и размеры элементов которого определяются особенностями процесса морозобойного растрескивания, специфического криогенного процесса, зависящего от климатических условий и состава отложений (Романовский, 1977). На разных стадиях своего развития полигональный микрорельеф может иметь совершенно разный характер, от полигонально-валиковых форм до полигонально-бугристых (рис. 1 а). Характер осадконакопления на разных элементах такого микрорельефа может сильно отличаться, приводя к накоплению не протяженных слоев одного состава, а многочисленных линз разного состава, отличающихся также содержанием органического вещества. В результате седиментационная слоистость отложений принципиально отличается от характера слоистости аналогичных по генезису отложений, образовавшихся в иных условиях.

Второе отличие – льдообразование в отложениях. Несмотря на то, что отложения ЛК рассматриваются как синкриогенные, окончательный переход конкретных слоев в многолетнемерзлое состояние происходит спустя десятки и сотни лет после осадконакопления. Промерзание в субэдральных и мелководных субаквальных условиях приводит к появлению в толще отложений своеобразного минерального новообразования – сегрегационного льда, который в итоге занимает до 40-50% объема промерзших отложений.

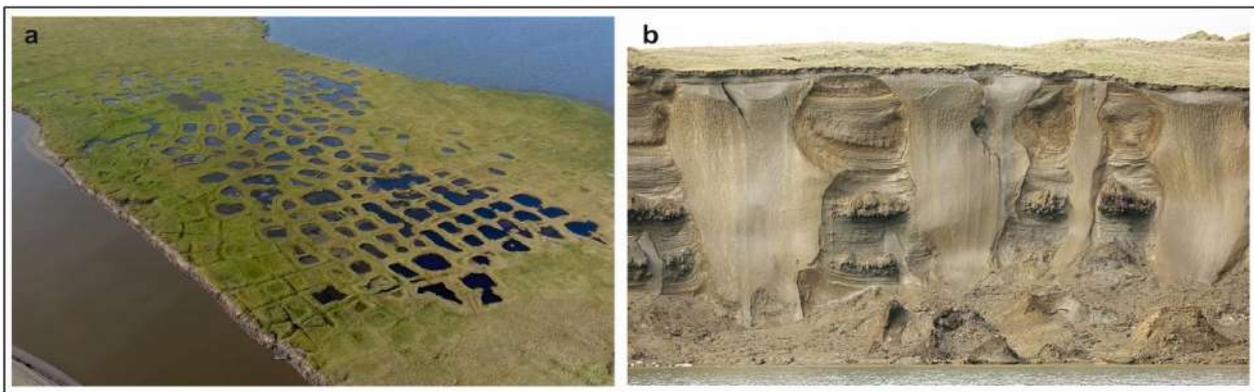


Рис. 1. а – различные формы полигонального микрорельефа, соседствующие друг с другом, на высокой пойме р. Бол. Чуко-  
 чья; б – ледяные жилы и вмещающие их сильнольдистые отложения с элементами седиментационной и криогенной слоисто-  
 сти (о-в Бол. Ляховский, высота обрыва 25 м).

Появление льда нарушает и маскирует седиментационную слоистость, которая в ЛК часто проявляется только за счет присутствия в отложениях полигональных линз оторфованных в разной степени суглинков, супесей или песков, линз торфа, образуя одновременно криогенную псевдослоистость за счет ориентации ледяных включений (рис. 1б). Кроме того, образование сегрегационного льда приводит к распучиванию образующихся отложений. Таким образом образующая толща ЛК увеличивает свою мощность не только за счет накопления слоев органико-минерального вещества, но и за счет их последующего распучивания. Более того, геологически одновременно с осадконакоплением в толще ЛК растут ПЖЛ, занимая собой значительный объем толщи ЛК. Т.к. образование элементарных ледяных жилок происходит раньше, чем ежегодное формирование слоев, то последние откладываются уже поверх таких жилок. В результате за счет роста ПЖЛ и сегрегационного льдовыделения суммарная льдистость толщ отложений ЛК достигает 70-95% (рис. 1б). Это означает, что если вне криолитозоны за 10 тыс. лет накапливается, например, 10 м аллювиальных отложений, то в суровых геокриологических условиях их промерзание по синкриогенному типу с образованием ПЖЛ приведет к появлению толщи ЛК мощностью от 33 до 200 м.

Рассмотренные выше особенности осадконакопления приводят к тому, что четвертичные отложения, накапливавшиеся на суше в суровых геокриологических условиях, имеют повышенные мощности и неясно выраженную или почти отсутствующую слоистость. Из-за этого не всегда четко выраженные латеральные границы таких толщ не позволяют во многих случаях уверенно проводить границы между ними. Изучение отложений осложняется также тем, что благодаря длительному пребыванию в пределах сезонно-талого слоя, подвергаясь многократным циклам промерзания-оттаивания, осадки приобретают повышенную пылеватость (Конищев, 1981), которая дополнительно маскирует слоистость и увеличивает влажность осадков. Быстрое увеличение мощности отложений ЛК за счет льдовыделения приводит к более интенсивному наращиванию высоты речных и озёрных террас,

мощности болотных, пролювиально-делювиальных, делювиально-солифлюкционных и других типов отложений. Поэтому динамика процессов аккумуляции и размыва отложений в криолитозоне оказывается выше, чем вне нее. Льдовыделение в синкриогенных отложениях увеличивается по направлению на север, что в свое время по сути послужило одной из причин выделения отложений ЛК шельфового и субарктического типов. Увеличение за счет этого мощности аллювия в низовьях рек на осушенном в криохроны арктическом шельфе частично компенсировало понижение базиса эрозии рек, впадавших в Северный Ледовитый океан. В результате этого небольшие продольные уклоны речных долин способствовали меандрированию и фуркации водотоков, перемыву отложений. В прибортовых частях долин склоновые отложения поставляли значительное количество дисперсного материала, который формировал толщи ЛК как сам по себе, так и в тесном взаимодействии с аллювием. Это приводило к формированию специфических форм рельефа – террасоувалов (Карташов, 1966), широко распространенных здесь и в настоящее время.

Значительную, но до сих пор слабо оцененную, роль в формировании отложений ЛК в речных долинах могло играть горное оледенение Северо-Востока Евразии. Считается, что оно было незначительное, особенно во второй половине позднего неоплейстоцена, благодаря резко континентальному климату. Однако моренные отложения среднего и первой половины позднего неоплейстоцена в пределах Верхоянского и Черского хребтов, Колымского и Корякского нагорий, представленные валунными суглинками, имеют довольно широкое распространение (Bagr, Clark, 2012). С одной стороны, ледники обеспечивали более устойчивый гидрологический режим рек, берущих здесь свое начало (а это все основные реки приморских низменностей – Яна, Индигирка и Колыма), особенно в условиях континентального климата. С другой стороны, талые воды ледников поставляли в долины тонкодисперсный материал, переоткладывая моренный мелкозем. В верхних частях долин упомянутых рек в формировании отложений ЛК вполне могли участвовать

флювиогляциальные и лимногляциальные отложения, сменяясь вниз по течению аллювием, однако разделить эти генетические типы отложений, в силу указанных выше причин, не всегда просто.

Вполне возможно, что широко были развиты в долинах рек и эоловые процессы. Благодаря значительным колебаниям уровня воды в реках даже в настоя-

щее время в летний период значительная часть речных русел выходит на поверхность и подвергается эоловому раздуву (рис. 2). В результате формировались дюнные массивы, местами сохранившиеся до настоящего времени (например, в низовьях р. Колымы). Переветренный же материал отлагался на обширных участках и включался в толщи отложений иного генезиса.



Рис. 2. Современный эоловый перенос аллювиального материала, р. Яна.

Как было сказано в начале, ЛК как самостоятельное геологическое тело выделяется по криогенным особенностям отложений – наличию мощных ПЖЛ и высокой суммарной льдистости, т.е. по криолито-логическим признакам, а не по геолого-генетическим (особенностям залегания, состава и строения). В связи с этим можно утверждать, что отложения ЛК – это криогенетически идентичные отложения (синкриогенные), но в разных местах могут иметь разный генезис с точки зрения четвертичной геологии. Установление геологического генезиса является одной из основных задач четвертичной геологии в местах развития ЛК, в том числе и для целей картирования. Только такой подход позволит реконструировать фациальную архитектуру различных типов отложений, подвергшихся синкриогенезу, и воссоздать палеогеографическую ситуацию времени их аккумуляции.

#### Литература

1. Астахов В.И. Четвертичная геология суши. СПб, 2020. 434 с.
2. Карташов И.П. Террасоувалы и связанные с ними рыхлые отложения и россыпи. // Доклады Академии наук СССР, 1966. Том 166, №2, С. 424–426.
3. Конищев В.Н. Формирование состава дисперсных пород в криолитосфере. Новосибирск, Наука, 1981. 197 с.
4. Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск, 1977. 213 с.
5. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
6. Barr I., Clark C. Late Quaternary glaciations in Far NE Russia; combining moraines, topography and chronology to assess regional and global glaciation synchrony // Quaternary Science Reviews, 2012, vol. 53, pp. 72–87.
7. Schirmer L., Kunitsky V., Grosse G., Wetterich S. et al. Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on North-East Siberian Arctic coastal lowlands and islands—a review // Quaternary International, 2011. 241, pp. 3–25.

## НАБЛЮДЕНИЯ И РАСЧЁТЫ ГЛУБИНЫ ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТА НА ПЕРЕВАЛЕ АНЗОБ (ТАДЖИКИСТАН)

Д.М. Фролов, А.В. Кошурников, В.Е. Гагарин, Э.И. Додобоев

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, denisfrolov@mail.ru*

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4) и «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0).

В статье представлены результаты проводимых в последние годы наблюдений и расчётов глубины промерзания грунта на перевале Анзоб (Таджикистан). Расчётная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии снежного покрова через него в атмосферу.

*Ключевые слова: снежный покров, температура воздуха, температура и промерзание грунта*

The article focuses on results of recent observations and calculations of the depth of ground freezing at the Anzob pass (Tajikistan). The calculating scheme was based on the problem of thermal conductivity of a three-layer medium (snow, frozen and thawed ground) with a phase transition at the boundary. The heat balance equation included the energy of the phase transition, the inflow of heat from the thawed soil and outflow into the frozen soil and in the presence of snow cover through it into the atmosphere.

*Keywords: snow cover, air temperature, ground temperature and freezing*

В последние годы проводились исследования температуры грунта на перевале Анзоб (Таджикистан). Там были пройдены две скважины глубиной 3 м, оснащенные терморегистраторами, проводящими запись температурных данных в течение всего года. По проделанным наблюдениям с 2016 года перевал Анзоб относится к области сезонного промерзания. По данным термометрических наблюдений сезонное промерзание грунтов на этой территории на склонах северной экспозиции наблюдается с середины октября, и продолжаются до конца апреля. На отметке 1,5 м температура пород уже в конце мая меняется с отрицательной на положительную, а к началу июня происходит полное оттаивание пород. Учитывая снежный покров, состав пород и влажность, а также другие факторы, влияющие на глубину промерзания, было произведено моделирование глубины промерзания по разработанной расчётной схеме. Расчётное моделирование показало наличие сезонных мерзлых пород на склоне северной экспозиции на глубине до 1,5 м. Так, в зимний период 2018 года на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания грунта составила 1,5 метра (рис. 1). В зимний период 2020 года на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания грунта составила 1,2 метра при среднегодовой температуре грунтов 2,42 °С (рис. 2). Расчёты производились по разработанному ранее алгоритму и расчётной схеме, на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии

снежного покрова через него в атмосферу. Поток тепла рассчитывался по закону Фурье, как произведение теплопроводности и градиента температуры. Предполагалось, что температура в каждой из сред изменяется линейно. Для снежного покрова и мерзлого грунта использовалась формула теплопроводности двухслойной среды (DeGaetano et al, 2001; Frolov, 2019).

Расчет промерзания грунта, на основе данных о температуре воздуха и толщине и теплопроводности снежного покрова в течение зимнего периода позволял оценить интенсивность движения фронта промерзания в этот период времени. Зависимость скорости движения фронта промерзания находилась по расчетной схеме. Схема учитывала намерзание грунта снизу на массиве мерзлого грунта в зимний период на основе данных о ежедневной температуре воздуха (и толщине и теплопроводности снежного покрова).

Уравнение теплового баланса записывалось как  $F_1 = cLV + F_2$  или как:

$$dh_{\text{мр}}/dt = V = (F_1 - F_2)/cL, \quad (1)$$

где:  $F_1$  – отток тепла через замёрзший грунт (и снежный покров) от фронта промерзания ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) в атмосферу;  $cLV = cL dh_{\text{мр}}/dt$  – расход тепла на фазовый переход,  $c$  – влагосодержание грунта ( $1 - 4 \text{ кг}/\text{см}^3 \cdot \text{м}^2$ ), (последнее значение соответствует полному заполнению пор водой у легкой глины с плотностью  $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$  и коэффициентом пористости  $0,617$  (Грунтоведение, 2005));  $L$  – энергия фазового перехода ( $335 \text{ кДж}/\text{кг}$ );  $V = dh_{\text{мр}}/dt$  – скорость движения фронта промерзания ( $\text{см}/\text{с}$ );  $F_2$  – отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ).

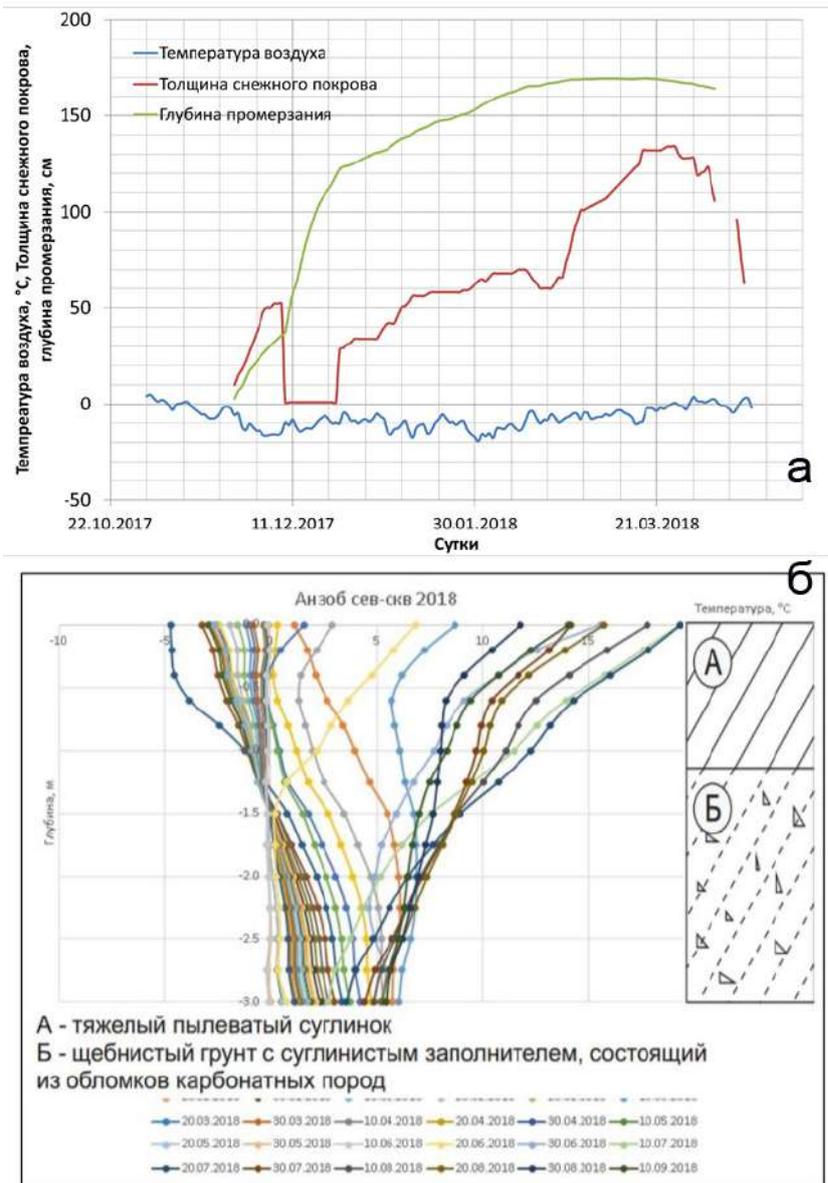


Рис. 1. Изменение температуры воздуха, толщины снежного покрова и расчётной глубины промерзания (а), годовые амплитуды температуры грунта на склонах северной экспозиции в зимний период 2018 года (б)

Тепловой поток выражался по закону Фурье:  $F = -\lambda \text{ grad } T$ . Тепловой поток через замёрзший грунт от фронта промерзания в атмосферу в случае наличия снежного покрова выражался через теплопроводность и тепловой поток комбинации из двух сред (снежный покров и мерзлый грунт) согласно данным справочника (Михеев, 1977) как:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\frac{\Delta T}{\frac{\Delta x_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta x_{мз}}{\lambda_{мз}}} = \frac{-T_{возд}}{\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_{мз}}{\lambda_{мз}}}, \quad (2)$$

Здесь  $T_{возд}$  – температура воздуха,  $h_c$  и  $h_{мз}$  – толщина снега и глубина промерзания, а  $\lambda_c$  и  $\lambda_{мз}$  – теплопроводность снега и мерзлого грунта.

Предполагалось, что на глубине 5 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры

$T_0$  со среднегодовым значением около 2,42°C. Поэтому

$$F_2 = -\lambda_{мз} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{мз} \frac{T_0}{5 - h_{мз}}, \quad (3)$$

Здесь  $\lambda_{мз}$  – теплопроводность талого грунта. Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлого грунта  $h_{мз}$  равнялась 0,5 см. На каждом шаге по времени (каждый день) вычислялась (рассчитывалась) скорость промерзания  $V$  и значение толщины мерзлого грунта  $h_{мз}$  для следующего дня (шага по времени). Согласно (Грунтоведение, 2005), средняя теплопроводность талого и мерзлого глинистого грунта могла быть взята как 1,4 и 1,8 Вт/м°C. Средняя теплопроводность снега  $\lambda_c$  рассчитывалась относительно плотности по формуле А.В. Павлова (Павлов, 1979) и бралась равной 0,18 Вт/м°C.

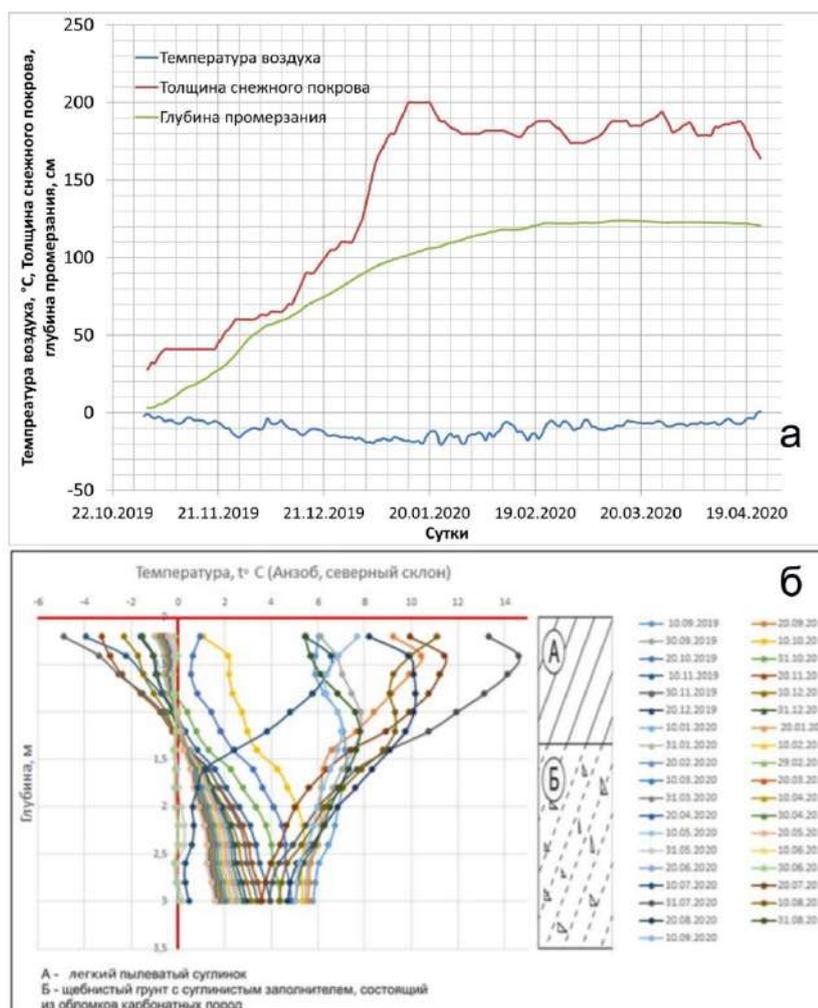


Рис. 2. Изменение температуры воздуха, толщины снежного покрова и расчётной глубины промерзания (а), годовые амплитуды температуры грунта на склонах северной экспозиции в зимний период 2020 года (б)

В работе для выведенного дифференциального уравнения по времени первого порядка для изменения глубины промерзания грунта была построена разностная схема посредством аппроксимации этого дифференциального уравнения явным методом Эйлера:  $h_{мг}(t_{n+1}) = h_{мг}(t_n) + \Delta t V(t_n)$ . По полученной разностной схеме для каждого зимнего сезона были произведены расчёты изменения глубины промерзания грунта. Примеры результатов расчёта для зимних периодов 2017/18 и 2019/20 приведены на рисунках 1 и 2.

Примененный метод расчёта является хорошо физически обоснованным. Решение по методу хорошо описывает процесс изменения глубины промерзания в течение зимнего сезона. Важным для успешной работы метода является наиболее возможно точное задание начальных данных.

Согласно расчётам, грунт под снежным покровом остается мёрзлым на перевале Анзоб с ноября по апрель. Мощность накапливаемого снежного покрова может достигать при этом два метра и более. Таким образом, предложенный метод расчёта динамики глубины промерзания грунта на основе данных о температуре возду-

ха и толщине снежного покрова позволяет оценить промерзание грунта как фактора устойчивости грунта при строительстве селе- и лавинозащитных сооружений.

### Литература

1. Грунтоведение. Под ред. В.Т. Трофимов. М.: Изд-во МГУ, Наука, 2005, 1024 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, Энергия, 1977, 344 с.
3. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.
4. DeGaetano A.T., Cameron M.D., Wilks D.S. Physical simulation of maximum seasonal soil freezing depth in the united states using routine weather observation // Journal of Applied Meteorology, 2001, 40(3), pp. 546–555.
5. Frolov D.M. Calculation of ground freezing depth under bare and covered with the snow cover ground surface on the site of the meteorological observatory of Lomonosov Moscow State University for winter seasons of 2011/12–2017/18 // Environmental dynamics and global climate change. 2019. 10:86-90. <https://doi.org/10.17816/edgcc21203>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УПЛОТНЁННОГО СНЕГА

Д.М. Фролов, А.В. Кошурников, В.Е. Гагарин, Г.А. Ржаницын

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, denisfrolov@mail.ru*

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Опасность и риск природных процессов и явлений» (121051300175-4) и «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (121051100164-0).

В статье представлены результаты проводимых в последнее время испытаний на твёрдость уплотнённого снега и также измерялась скорость распространения продольных упругих волн в нём. Установлено, что эквивалентное сцепление уплотнённого снега при испытании шариковым штампом изменяется в пределах 0,018-0,25 кг/см<sup>2</sup>.

*Ключевые слова: снежный покров, механические и упругие свойства*

The article focuses on results of recent tests on the hardness of compacted snow and also measured the propagation velocity of elastic waves in it. It has been found that the equivalent adhesion of compacted snow when tested with a ball stamp varies within 0.018-0.25 kg/cm<sup>2</sup>.

*Keywords: snow cover, mechanical and elastic properties*

Для определения механических свойств обычного (естественного) снежного покрова (твёрдости) используются переносные микротвёрдомеры-пенетрометры, как то, например, разработки и производства Швейцарского института снеголавинных исследований “SnowMicroPen”. Для определения механических свойств (твёрдости) льда и мёрзлого грунта используются лабораторные и полевые переносные приборы, включающие похожий на принцип работы пенетрометра метод шарикового штампа. Однако, отдельного прибора для определения механических свойств (твёрдости) уплотнённого снега с целью мониторинга состояния горнолыжных трасс, зимних автодорог или аэродромов, например, и представляющего нечто среднее между двумя первыми приборами, авторам известно не было. Поэтому была предпринята попытка разработать такой прибор самим. За основу был взят прибор испытания грунтов «АСИС» НПП «Геотек» с методом испытания шариковым штампом, который использовался с минимальной силой давления (нагрузки) для применения к образцам плотного снега. Так был произведён эксперимент по измерению эквивалентного сцепления уплотнённого снега шариковым штампом (рис. 1).

Время эксперимента составило 20 минут. Была задана нагрузка в 200 ньютонов или 20 килограмм. Предварительно было произведено уплотнение образца с той же нагрузкой 200 ньютонов или 20 килограмм на площадь поверхности образца (на 39 см<sup>2</sup>) (около 50 кПа или 0,5 атм.) и также в течение 20 минут. Исходно брался средне-крупнозернистый снег, отобранный как свежеснеживший в январе и пролежавший до июля

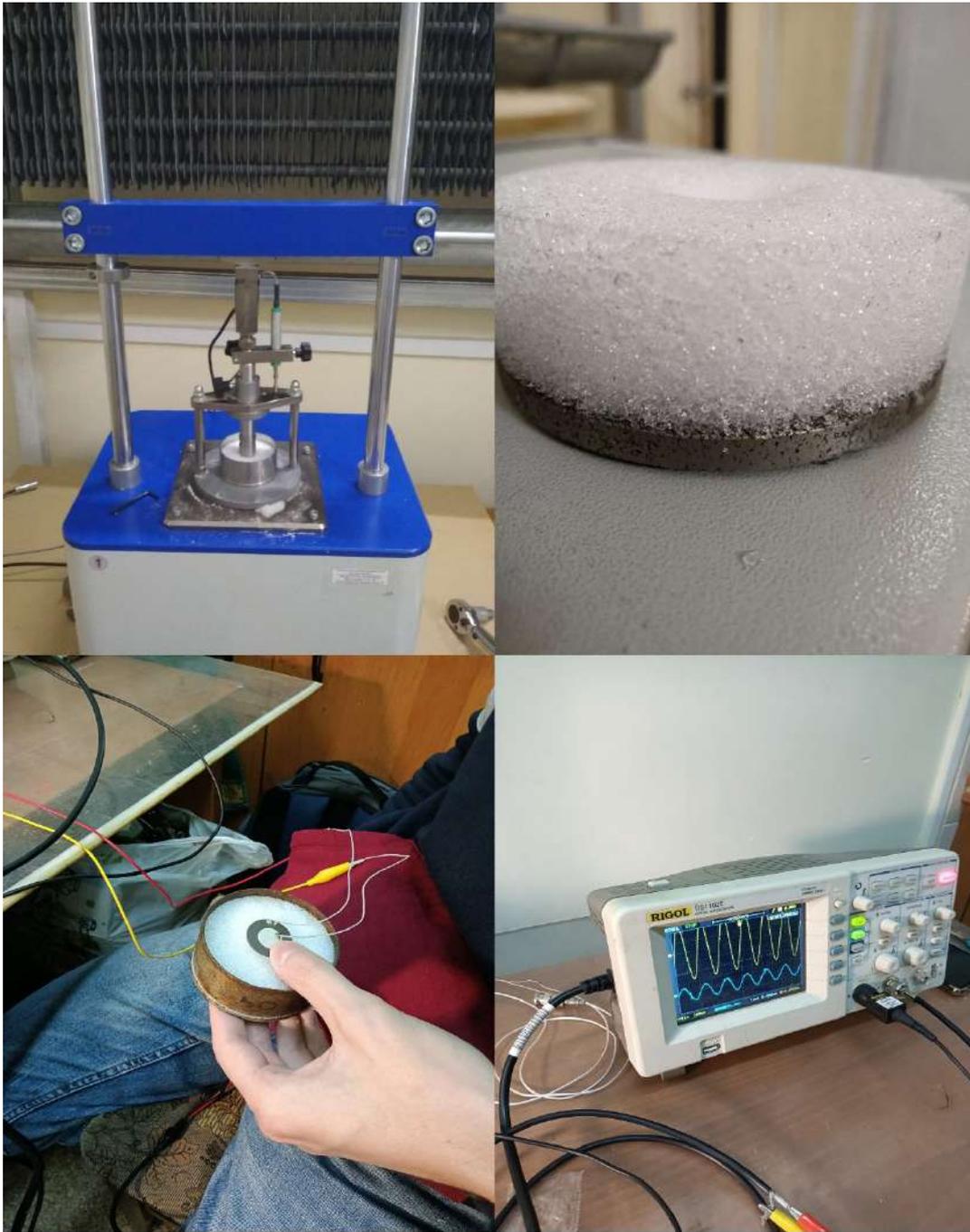
в холодильной камере с температурой -6°С и имеющий исходную плотность около 280 кг/м<sup>3</sup>. Эквивалентное сцепление для образца снега составило 0,018 кг/см<sup>2</sup>.

Для второго эксперимента время предварительного уплотнения с нагрузкой в 40 кг на 39 см<sup>2</sup> было 18 часов 30 минут снега с начальной плотностью 380 кг/м<sup>3</sup> до плотности 564 кг/м<sup>3</sup> потом был метод шарикового штампа 400 ньютонов (40 кг) измерено эквивалентное сцепление. Эквивалентное сцепление для образца снега составило 0,035 кг/см<sup>2</sup>.

В последующих экспериментах эквивалентное сцепление более плотных фирнизованных образцов снега менялось от 0,018 кг/см<sup>2</sup> и достигало 0,25 кг/см<sup>2</sup>, что соответствует твёрдости рыхлого рассольного льда. Для обычного же пресноводного льда эквивалентное сцепление может составлять 2,5 кг/см<sup>2</sup>. Была также измерена скорость распространения упругих продольных волн в этих образцах уплотнённого снега. Она изменялась от 600 до 2600 м/с в зависимости от структуры снега и плотности согласно (Фролов, 2005; Голубев, Фролов, 2006).

### Литература

1. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. -2-е изд., перераб. и доп. Пушино : ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. 607 с. ISBN 5-201-14551-5
2. Голубев В.Н., Фролов А.Д. Модель структуры и механических свойств сухого зернистого снега // Материалы гляциологических исследований. 2006. № 100. С. 207–212.



*Рис. 1. Измерение механических и упругих свойств уплотнённого снега методом шарикового штампа и пропускания продольных волн.*

## ФАКТОРЫ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ШУ-САРЫСУЙСКОЙ ПРОВИНЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Д.Б. Ченсизбаев, Д.К. Аденова, С.М. Кан

*Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина, Алматы, Казахстан  
igg.info@mail.ru*

В работе приведены основные условия и факторы формирования промышленных вод в Шу-Сарысуйской провинции Республики Казахстан, в том числе и попутно добываемых при разработке месторождений нефти и газа пластовых рассолов в качестве гидроминерального сырья. Описывается значимость редких элементов, и перспектива освоения гидроминерального сырья, куда входит добыча и переработка. Южно - Казахстанская область является одна из самых перспективных регионов куда входит Шу-Сарысуйская провинция промышленных вод. Приведены данные о содержании редких элементов в подземных водах провинции Шу-Сарысу. Экспертная оценка на текущее время содержания микроэлементов в природных водах.

*Ключевые слова: промышленная вода, гидроминеральное сырье, рассолы, редкие элементы, месторождение, переработка, добыча, формирование.*

The article presents the main conditions and factors for the formation of industrial waters in the Shu-Sarysu province of the Republic of Kazakhstan, including formation brines produced during the development of oil and gas fields as hydromineral raw materials. The importance of rare elements, and the prospects for the development of hydromineral raw materials, which includes mining and processing, are described. South Kazakhstan region is one of the most promising regions, which includes the Shu-Sarysu province of industrial waters. The data on the content of rare elements in groundwater of the Shu-Sarysu province are presented. Expert assessment at the current time of the content of trace elements in natural waters.

*Keywords: industrial water, hydromineral raw materials, brines, rare elements, deposit, processing, extraction, formation.*

Подземные воды всегда играли значительную роль в развитии экономики Казахстана. Особенно велика значимость, учитывая дефицит поверхностных вод на территории республики, пресных и слабо солоноватых подземных вод. Преимущественно они используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения населенных пунктов и сельскохозяйственных объектов. В последнее время, учитывая истощаемость месторождений твердых полезных ископаемых и редкость некоторых элементов, все большее внимание уделяется промышленным водам. К промышленным относят подземные воды и рассолы, содержащие полезные компоненты или их соединения в количествах, обеспечивающих в пределах конкретных гидрогеологических районов (или их отдельных частей) рентабельную добычу и переработку этих вод с целью получения полезной продукции существующими техническими средствами и с использованием современных технологий извлечения (Посохов, Толстихин, 1977; Бондаренко, Куликов, 1984; Зелинская, Воронина, 2009; Промышленные воды..., 2017)

Промышленное освоение уникальных пластовых рассолов целесообразно осуществлять и в комплексе с освоением ресурсов углеводородного сырья. Добыча и переработка рассолов, благодаря быстрой окупаемости капитальных вложений и высокой рентабельности производства, могут стать дополнительным источником инвестиций в освоении месторождений нефти и газа. При этом контроль при извлечении полезных компонентов из рассолов и дальнейшее утилизация и обратная закачка их в зависимости от физико-геогра-

фических и геолого-структурных особенностей региона актуальны и при решении экологических задач

В настоящее время на территории Казахстана выделено 4 провинции промышленных вод: Прикаспийская, Мангистау-Устюртская, Шу-Сарысуйская и Южно-Торгайская, а также 2 предположительных провинции: Тенизская и Зайсанская. (рис. 1)

Промышленные подземные воды на территории Казахстана, в основном непосредственно связаны с зонами нефтегазоаккумуляции, и приурочены, как правило, к глубоким частям крупных артезианских бассейнов, которые в структурно-тектоническом отношении соответствуют впадинам, выделяемым в рельефе складчатого основания древних докембрийских и эпигерцинских платформ, крупным предгорным и межгорным впадинам.

Масштабы распространения, химический состав промышленных подземных вод и характер изменения в них концентраций редких элементов различны в разных районах и определяются общей гидрогеологической обстановкой, обусловленной геологической историей районов их распространения.

В пределах провинций выделяются области промышленных вод, являющиеся гидрогеологическими структурами второго порядка и характеризующиеся общностью гидрогеологических условий и определенным составом подземных вод, в котором содержание полезных элементов имеет соответствующий уровень концентраций. Далее в пределах областей выделяют промышленные районы и в них - месторождения промышленных вод.

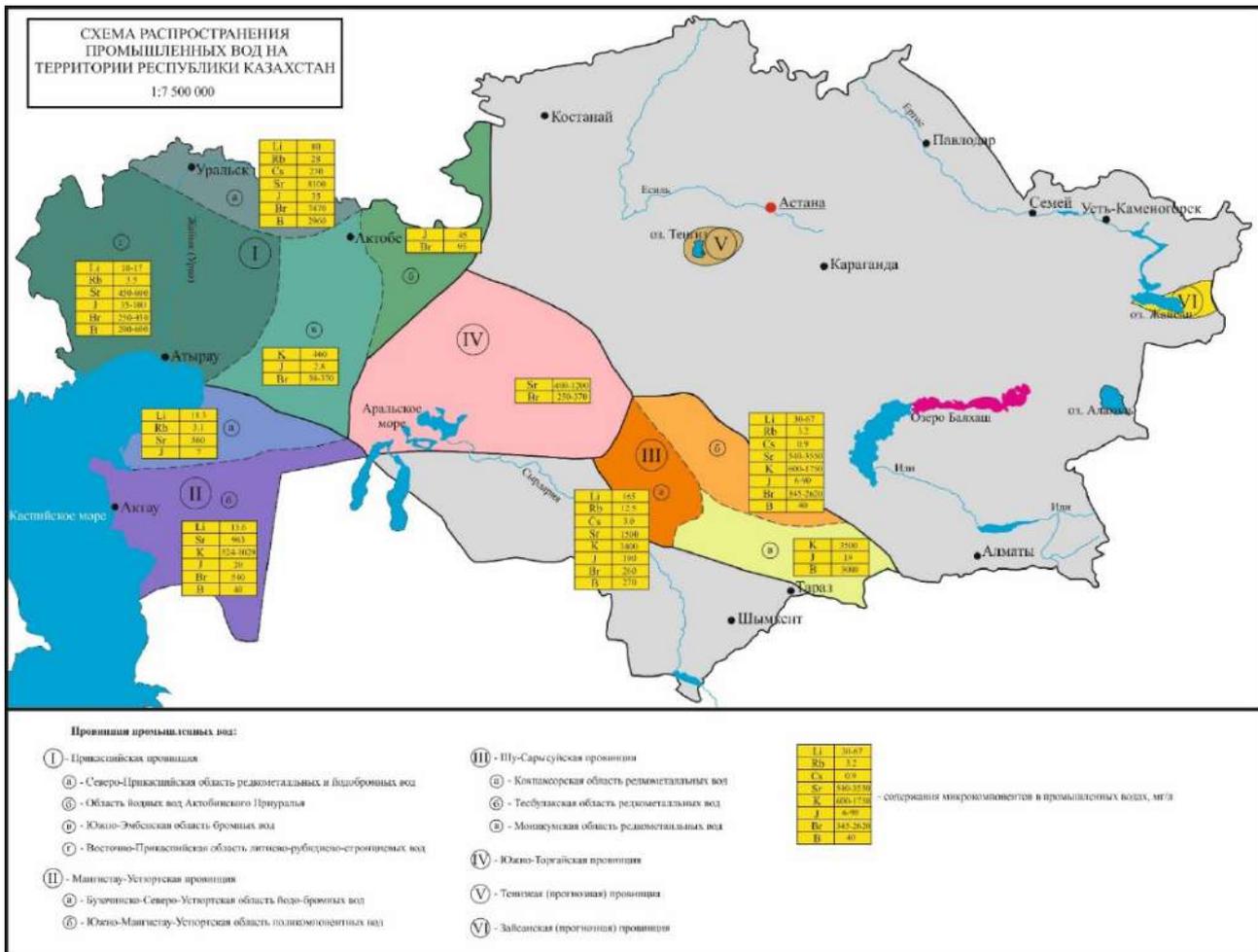


Рис. 1. Схема распространения промышленных вод на территории Республики Казахстан (Промышленные воды..., 2017)

I – Прикаспийская провинция, а) Северо-Прикаспийская область редкометалльных и йодобромных вод, б) Область йодных вод Актобинского Приуралья, в) Эжно-Эмбинская область бромных вод, г) Восточно-Прикаспийская область литиево-рубидиево-стронциевых вод: II – Мангистау-Устюртская провинция, а) Бузачинско-Северо-Устюртская область йодо-бромных вод, б) Южно-Мангистау-Устюртская область поликомпонентных вод: III – Шу-Сарысузская провинция, а) Кокпаксорская область редкометалльных вод, б) Тесбулакская область редкометалльных вод, в) Моимкумская область редкометалльных вод: IV – Южно-Торгайская провинция: V – Тенизская (прогнозная) провинция: VI – Зайсанская (прогнозная) провинция.

Промышленные подземные воды на территории Казахстана, в основном непосредственно связаны с зонами нефтегазоаккумуляции, и приурочены, как правило, к глубоким частям крупных артезианских бассейнов, которые в структурно-тектоническом отношении соответствуют впадинам, выделяемым в рельефе складчатого основания древних докембрийских и эпигерцинских платформ, крупным предгорным и межгорным впадинам. (Промышленные воды..., 2017).

Территория Южного Казахстана, на которой расположена Шу-Сарысузская депрессия (Муонкум-Бетпакдалинский бассейн), ограничена на юге хребтами Киргизский и Таласский Алатау, на западе – хр. Каратау, на севере – Центрально-Казахстанским мелко-сопочником. Восточной границей служат каменистая Бетпак Дала и Чу-Илийские горы.

В Шу-Сарысузской провинции редкометалльных вод, пространственно совпадающей с одноименной

тектонической впадиной и артезианским бассейном Южного Казахстана, выделяются три области.

1) Кокпаксорская область редкометалльных вод представлена в основном рассолами с минерализацией 30–150 г/л, приуроченными к отложениям верхнего девона - нижнего карбона, залегающим на глубинах 570–3500 м. Здесь при испытании скважин на структурах Центральной, Придорожной, Орталык были получены притоки рассолов с минерализацией 55–305 г/л. Дебиты скважин составляют 0,03–0,4 л/с. Концентрации редких металлов достигают, мг/л: литий – 5–165; стронций – до 1500; рубидий – 0,2–12,5; цезий – 0,1–3,0; калий – до 3400; йод – 20–190; бром – 200–260; бор – до 270.

2) Моимкумская область редкометалльных вод приурочена к отложениям верхнего девона и нижнего карбона, залегающим на глубинах 870–2500 м, и представлена рассолами с минерализацией 130–230

г/л. При испытании скважин на площадях Амангельды, Айрақты, Саякпай, Колькудук дебиты скважин составили 0,02–0,3 л/с, содержание микрокомпонентов, мг/л: литий – 30–67; рубидий – до 3,2; цезий – 0,1–0,9; стронций – 540–3550; калий – 600–1750; йод – 6–90; бром – 345–2620; бор – 1,6–40.

3) Тесбулакская область редкометалльных вод слабо изучена по одиночным скважинам, вскрывшим на глубинах 2900–3500 м верхнедевонские-нижнекарбонные отложения с рассолами, минерализация которых достигает 130–320 г/л. Дебиты скважин низкие - сотые доли л/с. В водах отмечены повышенные концентрации калия до 3500; йода – 19; брома – до 3000 мг/л.

Закономерности распространения и условия накопления редких галогенных и щелочных элементов в промышленных подземных водах разнообразны и зависят от состава вод, физико-химических и геологических обстановок их формирования. Большое значение также играют геохимические особенности самого элемента, положение его в периодической системе Д.И. Менделеева. Из всего разнообразия природных

вод, которые могут содержать промышленные концентрации микроэлементов, рассмотрены пластовые хлоридные рассолы артезианских бассейнов, которые по масштабам концентрации редких элементов и своим потенциальным запасам представляют практический интерес. Именно они являются основным аккумулятором и мигрантом редких элементов (Промышленные воды..., 2017).

### Литература

1. Бондаренко С.С., Куликов Г.В. Подземные промышленные воды. М.: Недра. 1984. 385 с.
2. Посохов Е.В., Толстихин Н.И. Минеральные воды (лечебные, промышленные, энергетические). Л.: Недра, 1977. 240 с.
3. Зелинская Е.В., Воронина Е.Ю. Теоретические аспекты использования гидроминерального сырья. М.: Академия Естествознания, 2009. 118 с.
4. Промышленные воды и оценка загрязнения нефтегазоносной среды регионов Казахстана. Алматы PrintMaster 2017

Таблица 1. Содержание редких элементов в подземных водах в Шу-Сарысуйской провинции

Провинция, область промышленных вод	Глубина залегания промышленных вод, м	Минерализация, г/л	Дебит скважины, л/с	Содержание микрокомпонентов, мг/л							
				Литий	Рубидий	Цезий	Стронций	Калий	Йод	Бром	Бор
3. Шу-Сарысуйская провинция											
3.1 Кокпансорская область редкометалльных вод	570–3500	30–150	0,03–0,4	5–165	0,2–12,5	0,1–3	до 1500	до 3400	20–190	200–260	до 270
3.2 Моинкумская область редкометалльных вод	870–2500	130–320	0,02–0,3	30–67	до 3,2	0,1–0,9	540–3500	600–1750	6–90	340–2620	16–40
3.3 Терсбулакская область редкометалльных вод	2900–3500	300–320	–	–	–	–	–	до 3500	19	до 3000	–
4. Южно-Торгайская провинция	500–2800	67–150	0,03–0,2	–	–	–	400–1200	–	–	250–370	–
5. Тенизская провинция	> 500	120–150	выделена по аналогии								

Примечание. Содержание редких элементов в подземных водах (Институт гидрогеологии и геоэкологии им. У.М. Ахмедсафина (г. Алматы))

## УСТОЙЧИВОСТЬ ПОЛЯ АККУМУЛЯЦИИ И ПОЛЯ АБЛЯЦИИ ЛЕДНИКА ДЖАНКУАТ

А.М. Чеховских<sup>1</sup>, В.В. Поповнин<sup>2</sup>

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>1</sup>*chehovskiy.medved@yandex.ru*

<sup>2</sup>*begemotina@hotmail.com*

Исследование посвящено проблеме устойчивости гляциологических полей ледника Джанкуат (Центральный Кавказ). В работе представлен анализ факторов внешнего массоэнергообмена, формирующих поле аккумуляции и поле абляции. На основе данных полевых масс-балансовых наблюдений построены картосхемы распределения аккумуляции и абляции. С использованием пространственных и временных корреляционных связей оценена изменчивость и устойчивость полей балансовых величин.

*Ключевые слова: устойчивость гляциологических полей, поле аккумуляции, поле абляции, ледник Джанкуат, внешний массоэнергообмен ледников*

The study is devoted to the problem of stability of glaciological fields of the Djankuat glacier (Central Caucasus). The paper presents an analysis of external mass and energy exchange factors that form accumulation field and ablation field. Using field mass-balance observations schematic maps of accumulation and ablation distribution were constructed. Spatial and temporal correlations were applied to quantify variability and stability of glaciological fields.

*Keywords: stability of glaciological fields, accumulation field, ablation field, Djankuat glacier, external mass and energy exchange of glaciers*

В настоящее время прямыми исследованиями охвачено менее 10 000 горных ледников (Glacier..., 2020), а ежегодные измерения баланса массы проводятся примерно на 150 ледниках (Kurzboeck, Huss, 2021), поэтому мониторинг баланса массы и анализ компонентов внутреннего и внешнего массообмена ледников остается важнейшей фундаментальной проблемой гляциологии.

Распределение аккумуляции и абляции на поверхности ледника происходит под действием климатических, метеорологических и геоморфологических факторов, которые влияют на выпадение и перераспределение твердых атмосферных осадков на поверхности ледника в период аккумуляции, а также на интенсивность поверхностного таяния в период абляции. В результате формируются специфические в ряду наблюдений сезонные поля аккумуляции и абляции.

Цель исследования заключается в изучении и количественной оценке пространственно-временной изменчивости полей аккумуляции и абляции на леднике Джанкуат. Картографирование полей компонентов баланса массы и исследование их изменчивости имеет теоретическое научное значение и практическую значимость: выявление участков с наибольшей и наименьшей устойчивостью способствует сокращению объёма гляциологических работ и корректному расчету баланса массы ледника в случае невозможности проведения полноценных полевых работ.

Данная работа объединяет результаты исследования пространственно-временной устойчивости полей аккумуляции и абляции ледника Джанкуат, выполненных В.В. Поповниным (1989), Д.А. Петраковым (2000 а, б), В.Н. Пастуховым (2011), и представляет новые

результаты оценки устойчивости полей внешнего массоэнергообмена ледника Джанкуат за период с 1976 по 2009 гг. для аккумуляции, с 1987 по 2009 гг. для абляции.

Ледник Джанкуат расположен на северном макросклоне центрального сектора Главного Кавказского хребта в верховьях долины р. Адыл-Су. В настоящее время ледник Джанкуат находится в диапазоне высот 2750 - 3600 м, имеет ССЗ-экспозицию, длина - менее 3 км, высота границы питания колеблется между 3200 и 3300 м, площадь - 2,233 км<sup>2</sup> (Zemp et al., 2019), средний уклон поверхности составляет 23<sup>0</sup> и 13% площади ледника забронировано поверхностной мореной (Резепкин, Поповнин, 2018).

Для проведения анализа полей ледника Джанкуат в программной среде ESRI ArcMap построены картосхемы распределения максимальных водозапаса (аккумуляции) за период 1976/1977, 1979/1980 – 2008/2009 гг., абляции – с 1987/1988 по 2008/2009 гг. На основе визуального анализа определены ареалы повышенных и пониженных значений балансовых величин и выявлены закономерности, свидетельствующие о подобию полей.

Межгодовая изменчивость аккумуляции и абляции на леднике Джанкуат оценена в узлах сетки квадратов 50x50 м с помощью коэффициента вариации: для аккумуляции он изменяется от 0,20 до 1,32 (среднее значение  $C_v = 0,35$ , или 86 мм.в.э.), для абляции – от 0,13 до 0,71 (среднее значение  $C_v = 0,26$ , или 74 мм.в.э.). Сопоставление схем распределения коэффициентов вариации аккумуляции и абляции свидетельствует о том, что одни и те же части ледника синхронно подвержены большей изменчивости, однако по результатам расче-

тов поле абляции обладает меньшей изменчивостью, чем поля аккумуляции.

Для количественной оценки устойчивости полей аккумуляции и абляции использовано 5 типов корреляционных связей. Для оценки временной устойчивости использована связь  $r_{1.1} = r\{E_{ai}; E_a\}$ , рассчитываемая для каждого отдельного года и связывающая годовые и среднееголетние значения, и межгодовая связь  $r_{1.2} = r\{E_{ai}; E_{aj}\}$ . Построенная для аккумуляции и абляции корреляционная матрица иллюстрирует, что связь  $r_{1.2}$  заметно слабее  $r_{1.1}$ .

Пространственная устойчивость исследована с помощью связи  $r_{2.1} = r\{E_{ai}; E_i\}$ , отражающей, насколько тесно из года в год выдерживается связь между значением параметра в точке и среднеледниковым значением, связи  $r_{2.2} = r\{E_a; E_z\}$  (исследуется стабильность в точке относительно зональной величины) и связи  $r_{2.3} = r\{E_z; E_i\}$ . Сопоставление результатов расчетов пространственных связей показывает, что высотно-морфологическая зона в качестве отдельного поля обладает большей устойчивостью по сравнению с единым ледниковым полем.

### Литература

1. Пастухов В.Г. Полный массообмен ледника Джанкуат. Дипломная работа. М.: МГУ, 2011. 185 с.
2. Петраков Д.А. Устойчивость полей внешнего массообмена горного ледника: Диссертация на соискание ученой степени канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2000. 218 с.
3. Петраков Д.А., Поповнин В.В. Поле аккумуляции горного ледника и его устойчивость во времени // Криосфера Земли. 2000. №4(2). С. 67–76.
4. Поповнин В.В. Бюджетная эволюция репрезентативного ледника Джанкуат (Центральный Кавказ). Диссертация на соискание ученой степени канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1989. 305 с.
5. Резепкин А.А., Поповнин В.В. О влиянии поверхностной морены на состояние ледника Джанкуат (Центральный Кавказ) к 2025 г // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 3. С. 307–321.
6. Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016-2017). Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Bannwart J., Rastner P., Paul F., Hoelzle M., ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 274 pp., doi:10.5904/wgms-fog-2019-12.
7. Kurzböck C., Huss M. Measurement, documentation and evaluation of glacier monitoring data. 2021.
8. Zemp M., Huss M., Thibert E., Eckert N., McNabb R., Bannwart J., Barandun M., Machguth H., Nussbaumer S., Gärtner-Roer I., Thomson L., Paul F., Maussion F., Kutuzov S., Cogley J. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016 // Nature. 2019. Т. 568. №. 7752. С. 382–386. doi:10.1038/s41586-019-1071-0M.

УДК 551.32

## СВЯЗЬ ДЕГРАДАЦИИ ЛЕДНИКА ВОДОПАДНЫЙ С ИЗМЕНЕНИЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ГОРНО-ЛЕДНИКОВОМ БАСЕЙНЕ АКТРУ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 80 ЛЕТ

Д.С. Чувичкин, А.А. Ерофеев

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, erofeew@yandex.ru*

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки, проект № 0721-2020-0041.

В статье исследована связь деградации ледника Водопадный, расположенного в горно-ледниковом бассейне Актру, с динамикой температуры атмосферного воздуха за последние 80 лет. Выявлена высокая корреляция среднечасовых (0,72) и среднесуточных (0,9) значений температуры атмосферного воздуха в летний период между метеопостами Водопадный (3050 метров н.у.м.) и Учитель (3100 метров н.у.м.). По выявленной корреляции восстановлены пробелы в рядах температуры атмосферного воздуха для плато Водопадный по данным метеопоста Учитель, а в дальнейшем и ГМС Актру (3150 метров н.у.м.). Выявлены закономерности ускорения скорости сокращения ледника с увеличением средних летних температур воздуха.

*Ключевые слова: ледник Водопадный, бассейн Актру, температура воздуха, метеостанция, корреляционный анализ, изменение климата*

The article describes the relationship between the degradation of the Vodopadny glacier with dynamics of atmospheric air temperature over an 80-year period. Gaps in the air temperature series for the Vodopadny plateau (3050 m.a.s.l.) have been restored according to data from the Uchitel meteorological post (3100 m.a.s.l.) and the Aktru meteorostation (2150 m.a.s.l.). The regularities of the acceleration of the glacier reduction rate with the increase in the average summer air temperatures are revealed.

*Keywords: Vodopadny glacier, Aktru basin, air temperature, meteorological station, correlation analysis, climate change.*

По данным проекта Путь концентрации (Concentration Pathway) 8.5, к 2100 году в Мире ожидается потеря 37–57% массы горных ледников (Hock R. и др., 2019). Динамика климатозависимых изменений ледников Алтая в начале XX века также весьма велика. Ускоренная деградация оледенения приводит к трансформации наземных ландшафтов, обусловленных развитием экологических сукцессий, почв, а также другим видам их после ледниковой трансформации (Hedding и др., 2020).

Для исследования связи деградации ледника Водопадный с температурой воздуха была создана база климатических и пространственных данных. Коллекцию архивных метеорологических наблюдений составили данные, полученные на станции Нижняя Актру (ГМС Актру, 2150 м.), начиная с 1940 года, а также ряды метеоданных, полученных на метеопостах Учитель (3100 м.) и Водопадный (3050 м.) в летний период 1979, 1980, 1983-1986, 1987, 1988 годов.

Проведенный анализ показал высокую корреляцию среднечасовых (0,72) и среднесуточных (0,9) значений температуры атмосферного воздуха в летний период, полученных на станциях Водопадный и Учитель.

В случаях, когда метеонаблюдения отсутствовали на обеих станциях, заполнение пробелов выполнялось по данным с ГМС Актру, с которыми была выявлена также высокая корреляция среднесуточных значений.

Особое внимание было уделено средним летним температурам воздуха, которые вносят наибольший вклад в режим ледниковой абляции.

За рассматриваемый период были зафиксированы кратковременные потепления и похолодания, сменяющие друг друга. За отдельно взятые временные отрезки были выявлены следующие закономерности:

- средняя годовая температура воздуха по данным ГМС Актру за рассматриваемый период (с 1940 по 2020 гг.) составила  $-4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Рис. 2). По сравнению со сведениями, опубликованными в (Галахов и др., 1984), данный показатель увеличился на  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- средняя летняя температура с 1940 по 2020 год составила  $8,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- за период с 1996 по 2020 год наблюдался скачок средней летней температуры, которая за этот короткий промежуток времени повысилась на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (с  $8,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $9,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Рис. 3).

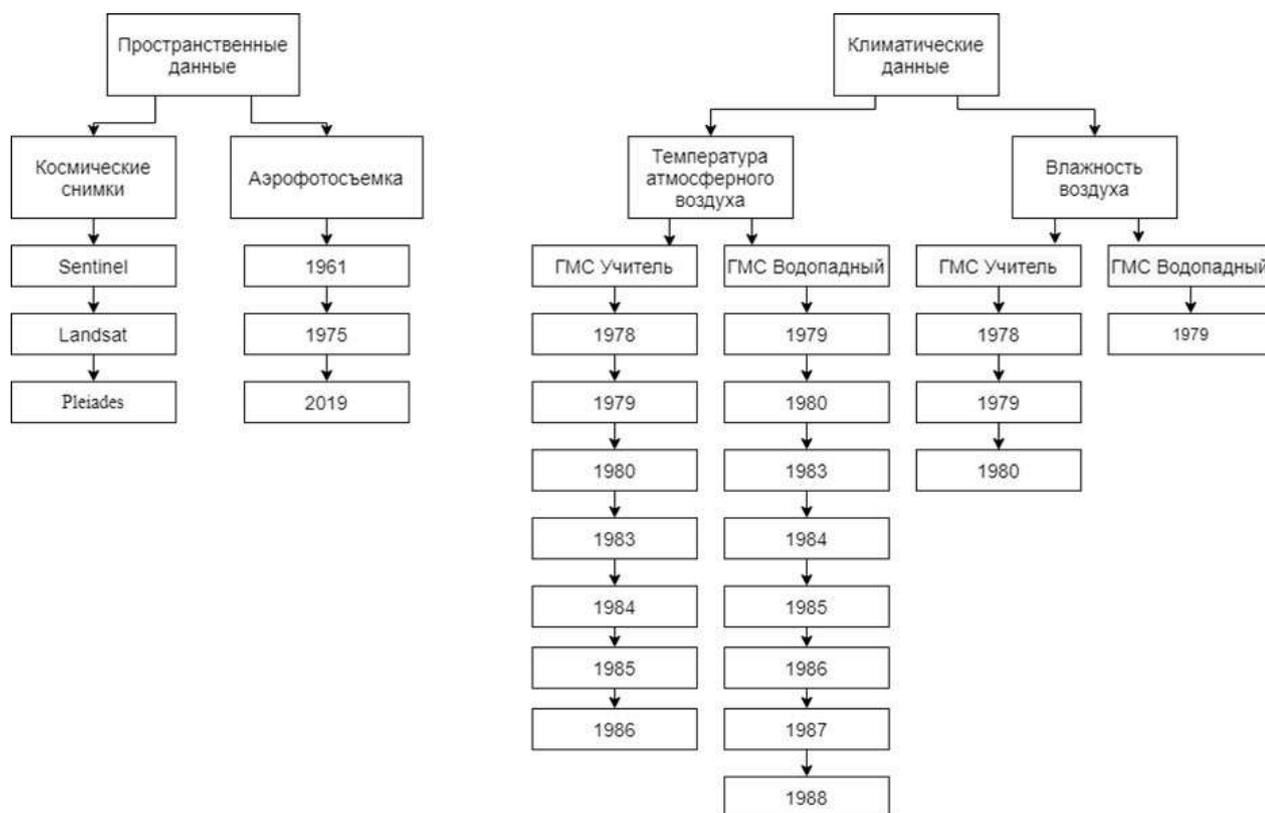


Рис. 1. Структура базы данных климатических параметров и пространственных данных в горно-ледниковом бассейне Актру

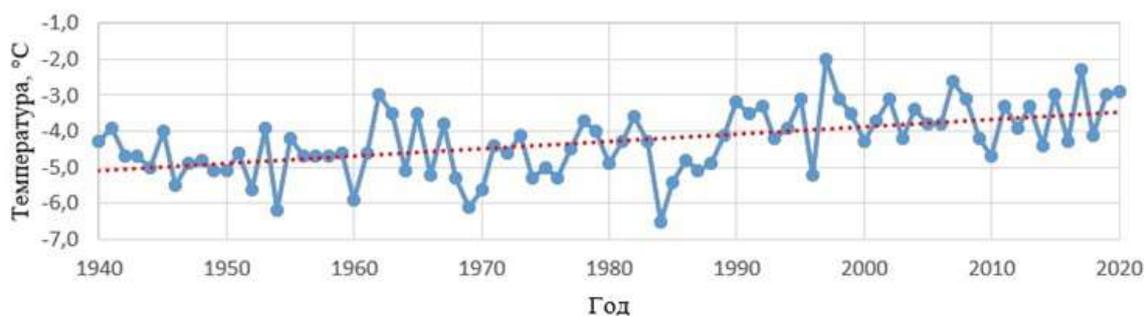


Рис. 2. График динамики средних годовых значений температуры атмосферного воздуха за период с 1940 по 2020 годы

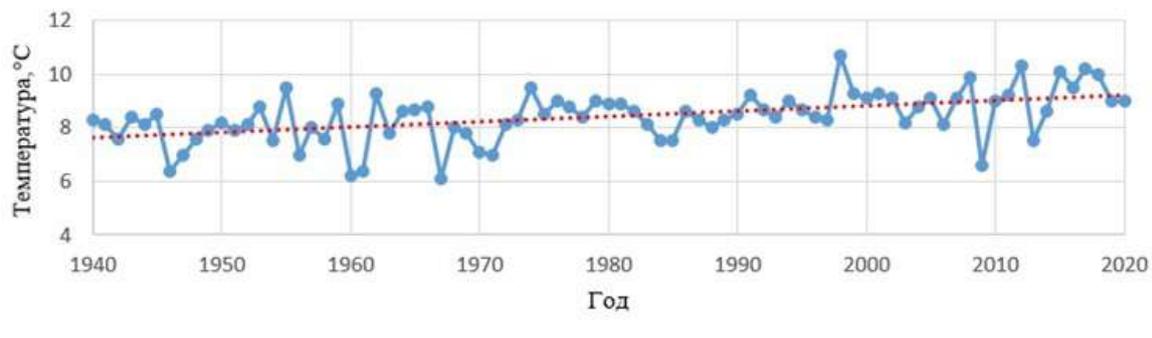


Рис. 3. График динамики средних летних значений температуры атмосферного воздуха за период с 1940 по 2020 годы

Анализ изучения динамики отступления ледника Водопадный показал, что ледник потерял более 30 % своей площади за рассматриваемый период. Так, в 1952 году площадь ледника составляла 1,1 км<sup>2</sup>, а к 1961 году сократилась до 0,96 км<sup>2</sup>. Средняя летняя температура за данный период составила 7,8 °С. За период 1961-1975 гг. средняя летняя температура уже составила 8 °С (средняя годовая -4,6 °С). Площадь ледника к 1975 году составила 0,86 км<sup>2</sup>. За период с 1975 по 2020 год средняя летняя температура составила 8,8 °С (средняя годовая -4 °С), а площадь ледника сократилась до 0,76 км<sup>2</sup>. Наиболее резко температура воздуха стала повышаться с середины 1990-х годов. Так, с 1996 по 2020 г. средняя годовая температура увеличилась с -4,6 до -3,6 °С.

### Литература

1. Галахов В.П., Нарожнев Ю.К., Никитин С.А. и др. Ледники Актру (Алтай). Л., 1987. 118 с.
2. Hock R., Bliss A., Marzeion B., Giesen R.H., Hirabayashi Y., Huss M., Radic V., and Slangen B.A. 2019. GlacierMIP - A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology* 65: 1–15.
3. Hedding D., Erofeev A., Hansen C., Khon A., Abbasov Z., Geomorphological processes and landforms of glacier forelands in the upper Aktru River basin (Gornyi Altai), Russia: evidence for rapid recent retreat and paraglacial adjustment. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(4).

**СЕКЦИЯ**  
**«СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРЫ**  
**И КЛИМАТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ»**

## МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И СТРУКТУРА ОТОПИТЕЛЬНОГО СЕЗОНА В ТОМСКЕ

**И.И. Абдукодилов, О.В. Носырева\*, Н.К. Барашкова, Л.И. Кижнер**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

*\*ov\_nosyreva@mail.ru*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 p\_a.

Энергосбережение на данный момент является актуальной проблемой не только в России, но и во всем мире. В понимании обычного обывателя энергосбережение – это денежная экономия, а если рассматривать этот вопрос на глобальном уровне, то это прежде всего экономия ресурсов, обеспечивать комфортного пребывания людей в закрытых помещениях, безвредное производство и сокращенные затраты на громадные проекты по строительству электростанций. Выработка конкретных мер по уменьшению материальных затрат населения Томской области на энергоресурсы возможна на основе уточнения сроков отопительного сезона (начало, окончание, продолжительность).

*Ключевые слова: отопительный сезон, метеорологические факторы, Томск*

Energy saving is currently an urgent problem not only in Russia, but also all over the world. In the understanding of the average man in the street, energy saving is monetary savings, and if we consider this issue at the global level, then it is, first of all, saving resources, ensuring a comfortable stay of people in enclosed spaces, harmless production and reduced costs for huge projects for the construction of power plants. The development of specific measures to reduce the material costs of the population of the Tomsk region for energy resources is possible on the basis of specifying the timing of the heating season (beginning, end, duration).

*Keywords: heating season, meteorological factors, Tomsk*

Энергосбережение на данный момент является актуальной проблемой не только в России, но и во всем мире. В понимании обычного обывателя энергосбережение – это денежная экономия, а если рассматривать этот вопрос на глобальном уровне, то это прежде всего экономия ресурсов, обеспечивать комфортного пребывания людей в закрытых помещениях, безвредное производство и сокращенные затраты на громадные проекты по строительству электростанций.

Выработка конкретных мер по уменьшению материальных затрат населения Томской области за энергоресурсы возможна на основе уточнения структуры отопительного сезона (начало, окончание, продолжительность) (Барашкова, 2018; Носырева, 2018; Носырева, 2019; Nosyreva, 2018).

Целью работы является изучить метеорологические факторы установления отопительного сезона года в г. Томске на основе анализа календарных и метеорологических показателей.

В качестве исходных материалов в исследовании были использованы значения среднесуточной температуры воздуха и суточных сумм осадков для города Томска за период с 1960 по 2019 гг. Данные были взяты из климатического архива ВНИИГМИ–МЦД ([www.meteo.ru](http://www.meteo.ru)).

Для проведения исследования и решения поставленных задач были установлены даты устойчивого перехода температуры через 8 °С весной и осенью по методу Д.А. Педя (Педь, 1951). Была рассчитана продолжительность отопительного сезона (ОС) и продолжительность переходных периодов.

Также были рассчитаны основные метеорологические параметры отопительного сезона: число градусодней, продолжительность ОС, среднесуточная температура и сумма температур за ОС.

### Основные метеорологические параметры отопительного сезона

Одной из наиболее важных характеристик термического режима, дающей представление о суммарном удельном теплоснабжении зданий с учетом режимов их эксплуатации, является число градусодней (Q), определяемое по формуле (1):

$$Q = (T_v - T) n, \quad (1)$$

В нашем исследовании Q – число градусодней за отопительный сезон, начало и окончание которого определены по выбранным методикам;  $T_v$  – температура воздуха в помещении, принимаемая равной 18 °С; T – среднесуточная температура за отопительный период, °С; n – число дней отопительного периода.

Средние многолетние значения характеристик ОС представлены в таблице 1. Стандартное отклонение ( $\sigma$  – сигма).

### Структура переходных периодов отопительных сезонов.

Структура начала и конца отопительного сезона характеризовалась календарными и температурными показателями. Даты устойчивого перехода температуры через +8 °С весной и осенью рассчитывались с применением метода Д.А. Педя, который можно использовать для разработки способов определения дат включения и отключения отопления (Носырева, 2019).

Таблица 1. Средние многолетние значения характеристик ОС

Характеристики	n, дни	Q	T, °C	$\Sigma T$ , °C
$\sigma$	14	455	1,9	425
$X^- - \sigma$	222	5493	-9,1	-2133
$X^-$	236	5948	-7,2	-1708
$X^- + \sigma$	251	6403	-5,3	-1283

Таблица 2. Средние многолетние значения календарных границ переходных периодов ОС

Характеристики	ОД1	ОД2	ОД3	ВД1	ВД2	ВД3
$\sigma$	8	10	9	9	11	10
$X^- - \sigma$	31 авг.	12 сен.	26 сен.	14 апр.	6 май	22 май
$X^-$	8 сен.	22 сен.	6 окт.	24 апр.	17 май	1 июн.
$X^- + \sigma$	16 сен.	1 окт.	15 окт.	3 май	28 май	11 июн.

Для осеннего и весеннего отрезков времени отопительного сезона использовано краткое определение: «переходной период». Для осеннего переходного периода ОС были рассчитаны следующие календарные показатели:

- дата первого понижения среднесуточной температуры воздуха до +8 °C (ОД1);
  - дата устойчивого перехода температуры воздуха через 8 °C осенью по методу Педя (ОД2);
  - дата последней среднесуточной температуры воздуха +8 °C (ОД3);
  - продолжительность осеннего перехода, дни;
  - Для весеннего переходного периода ОС:
  - дата первого повышения среднесуточной температуры воздуха до 8 °C (ВД1);
  - дата устойчивого перехода температуры воздуха через 8 °C весной по методу Педя (ВД2);
  - дата последней среднесуточной температуры воздуха +8 °C (ВД3);
  - продолжительность весеннего перехода, дни;
- Также была рассчитана продолжительность отопительного сезона (ОС).

Средние значения рассчитанных календарных границ переходных периодов ОС представлены в таблице 2.

Набор указанных характеристик за 1960–2019 годы представлен на рисунке 1, из которого следует, что все анализируемые ОС имеют разные структуры переходных периодов. Осенью наиболее раннее первое понижение среднесуточной температуры до +8 °C (ОД1) наблюдалось 23 августа (1977–1978 гг.), а в 1981 и 2016 гг. наиболее позднее – 18 и 25 сентября. Наиболее поздняя дата ОД3 пришлась на 28 октября 2019 г. Длительность осенних переходных периодов составила от 1 до 56 дней. В целом можно отметить, что чем раньше ОД1, тем длиннее будет переходной период. Дата устойчивого перехода температуры воздуха через 8 °C осенью по методу Педя (ОД2) колеблется от самой ранней даты 26 августа в 1977 г. до самой поздней – 18 октября в 2011 г.

Весной самая ранняя дата ВД1 наблюдалась 2 апреля 2014 г., а наиболее поздняя дата ВД3 пришлась на

28 июня 1970 г. Длительность переходных периодов составила 11–68 дней. Дата устойчивого перехода температуры воздуха через 8 °C весной (ВД2) наиболее ранняя наблюдалась 22 апреля в 2007 г., наиболее поздняя – 14 июня в 1999 г.

В целом, для даты устойчивого перехода температуры через 8 °C осенью и весной характерно смещение на более ранние сроки.

Из всего вышесказанного можно сделать следующие основные выводы.

1. Число градусо-дней отличается от справочных данных (7500) в сторону уменьшения (6000). Продолжительность отопительного сезона для г. Томска изменяется от 206 до 267 дней, составляет в среднем 236 дней и так же характеризуется тенденцией к уменьшению. Средние и суммы температур при этом имеют положительную динамику за исследуемый период. Данные тенденции характеристик, возможно, являются следствием наблюдающихся изменений климата в регионе.

2. В динамике календарных границ переходных периодов ОС тенденций не обнаружено. В среднем дата начала и окончания осеннего переходного периода приходится на 9 сентября и 6 октября соответственно, дата начала и окончания весеннего переходного периода – на 21 апреля и 30 мая. Для даты устойчивого перехода температуры через 8 °C осенью характерно смещение на более ранние сроки, чем для даты устойчивого перехода температуры через 8 °C весной. Длительность переходного периода, как правило, осенью меньше, чем весной (28 и 39 дней соответственно).

Сроки отопительного сезона имеют важное значение в жизни людей и учитывают многие метеорологические характеристики, основная из которых – температура воздуха. Правильно установленные сроки ОС имеют большое социальное и экономическое значение. Для более эффективного использования энергетических ресурсов регионов необходимо детальное изучение календарных и метеорологических параметров отопительного сезона.

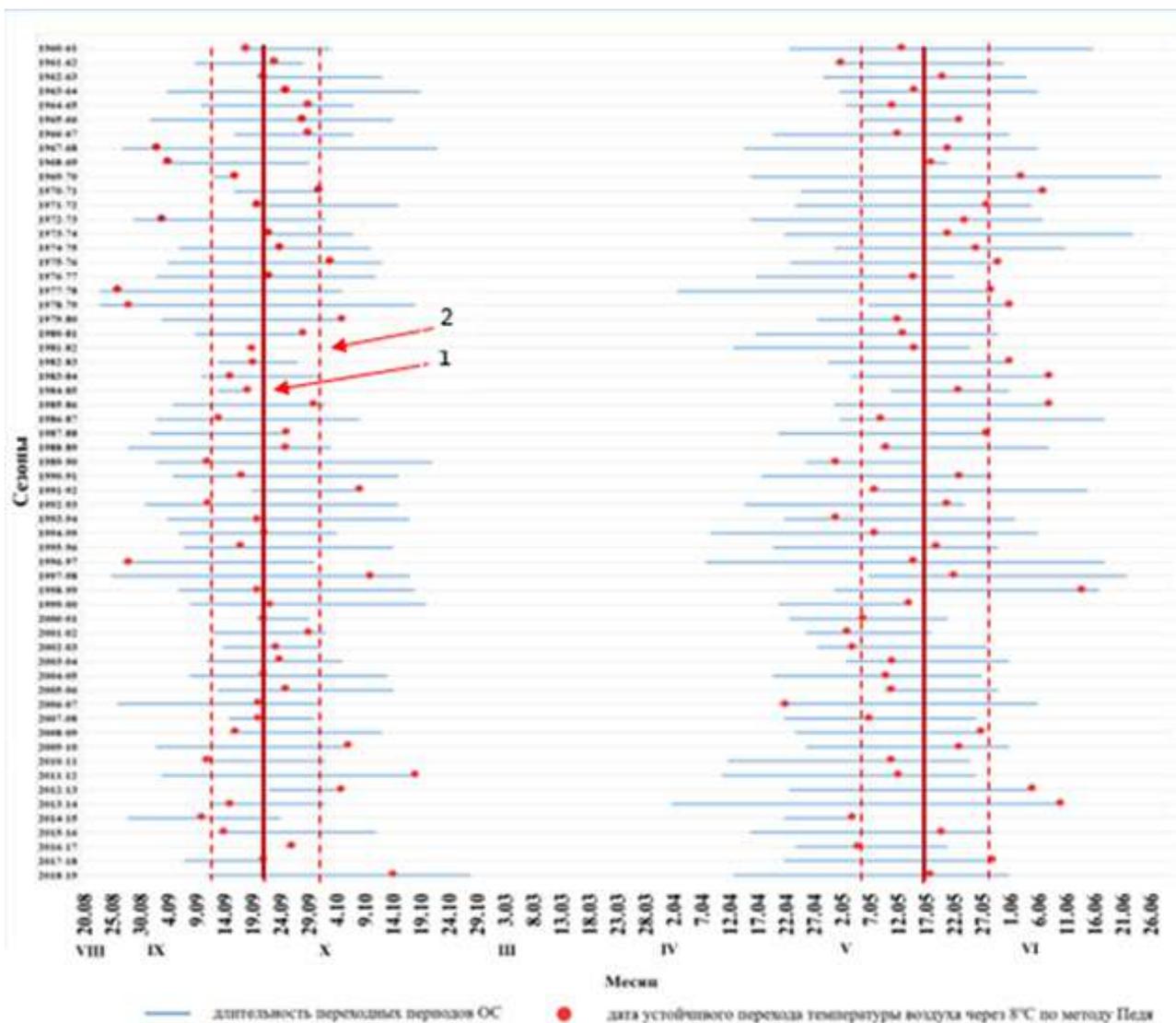


Рис. 1. Структура переходных периодов отопительных сезонов в г. Томск в 1960–2019 гг.  
 1 – среднее многолетнее значение даты устойчивого перехода через 8 °С; 2 –  $\pm\sigma$

### Литература

1. Барашкова Н.К., Носырева О.В., Кижнер Л.И. Климатология отопительного периода года в г. Томске / Сборник научных трудов международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития». 2018. С. 221–223.
2. Носырева О.В., Барашкова Н.К., Кижнер Л.И. Метеорологический режим начала и конца отопительного сезона в г. Томске / Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Институт вычислительной математики РАН. 2018. С. 345–348.
3. Носырева О.В., Барашкова Н.К., Кижнер Л.И. Определение продолжительности отопительного сезона / Метеорология и гидрология. Москва: Издательство Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета». 2019. № 9. С. 99–109.
4. Педь Д.А. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения // Метеорология и Гидрология, 1951. № 10. С. 38–39.
5. Nosyreva O.V., Barashkova N.K., Kizhner L.I. Determining the duration of the heating season in Tomsk / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems, ENVIROMIS 2018. 2018. С. 012056.

## ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ГОРАХ КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ В 2011–2021 ГОДАХ

М.М. Адаменко

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
Новокузнецк, Россия, adamenko.marina@gmail.com*

Обобщаются результаты исследований о распределении снежного покрова в пределах среднего и верхнего течения р. Верхняя Терсь. Приводятся данные о его высоте, плотности и влагозапасе в снежном покрове. В субальпийской зоне западного макросклона гор Кузнецкого Алатау на середину марта в снежном покрове накапливается до 1800 мм в слое воды. Доказана состоятельность мнения П.С. Шпина, утверждавшего, что величина годового количества осадков в горах Кузнецкого Алатау достигает 3000–3500 мм в год и более.

*Ключевые слова: изменение климата, увеличение осадков, снегомерные исследования*

The article summarizes the results of snow cover distribution research in the middle and upper reaches of the Verkhnyaya Ters' River. Data on snow depth, density and water content in the snow cover are presented. It was found that in the subalpine zone of the western macroslope of the Kuznetsk Alatau Mountains in mid-March, the snow cover accumulates up to 1800 mm in the water layer.

*Keywords: climate change, increased precipitation, snow measurements*

В вопросах условий распределения снежного покрова наветренный склон гор Кузнецкого Алатау изучен слабо. В частности, нет единого представления о количестве осадков, выпадающих в приводораздельной зоне западного макросклона гор. Максимальное годовое количество осадков в обозначенном районе неизвестно и в разных трудах оценивается по-разному. В «Ресурсах поверхностных вод СССР» – до 1500 мм/год (Ресурсы поверхностных вод СССР, 1972, с. 15, с. 16); расчетным методом по модулю стока – до 2190 мм/год (Шпинь, 1971, с. 165); по результатам снегомерных съемок в южной части западного макросклона Кузнецкого Алатау – до 3000 мм/год и более (Шпинь, 1975, с. 87). Кроме того, долгое время оставался неисследованным вопрос об объемах водозапаса в снежном покрове правых притоков реки Томь, берущих начало с западного макросклона Кузнецкого Алатау. Функционирующие гидропосты расположены в нижнем течении рек Верхняя и Средняя Терсь не дают информации о снегонакоплении в среднегорной зоне. Подобная недоизученность района, дающего речной сток на густонаселенную Кузнецкую котловину, в условиях меняющимся климата не позволяет спрогнозировать изменение природных условий и создает повышенные экологические риски.

В связи с обозначенной актуальностью Государственный заповедник «Кузнецкий Алатау» при помощи и непосредственном участии сотрудников Института горного дела и геосистем Сибирского государственного индустриального университета с 2011 года проводит систематические наблюдения за снежным покровом. В ходе полевых работ изучаются особенности снегонако-

пления в горах Кузнецкого Алатау, производится описание снежной толщи и определение плотности снега с дальнейшим расчетом водозапаса. Снегомерные работы проводились по стандартной методике (Быков, Попов, 2011).

Исследования ведутся в бассейне реки Верхняя Терсь (правый приток реки Томь). Снегомерный маршрут имеет протяженность 52 км и охватывает среднее и верхнее течение реки. Работы проводятся в первой декаде – середине марта. За прошедшие одиннадцать лет исследований, количество снегопунктов на снегомерном маршруте из года в год увеличивалось, при этом, оценивалась репрезентативность заложенных снегопунктов и отбирались наиболее показательные. К 2019 году снегомерный маршрут в долине Верхней Терси был сформирован и в настоящее включает 9 снегопунктов, которые равномерно расположены по долине от среднего течения до верховьев и наиболее показательно отображают особенности снегонакопления на западном макросклоне гор Кузнецкого Алатау.

Репрезентативность полученных результатов подтверждается высокой синхронностью с данными по ГМС «Ненастная», являющейся ближайшей метеостанцией к району исследований. Коэффициент корреляции между высотой снежного покрова на ГМС Ненастная и снегопунктами составляет 0,77–0,71.

Результаты снегомерных исследований представлены в таблицах 1–2. Статистические зависимости параметров снежного покрова по данным измерений 2020 года приведены на рисунке 1.

Таблица 1. Динамика высоты снежного покрова по 9 снегопунктам, в см

Снегопункт	Высота снегопункта, в м н.у.м.	Год								
		2011	2013	2014	2016	2017	2018	2019	2020	2021
«Кордон Соловей»	317	-	-	-	-	-	-	140	152	194
KUZ-VTR-1-SDG-2 «Кордон Верхняя Терсь»	319	189	182	-	-	216	138	155	223	225
KUZ-VTR-1-SDG-1 «Метеостанция»	398	175	172	164	215	206	143	160	188	216
«Тундра»	400	170	154	-	-	-	-	140	194	197
KUZ-VTR-1-SDG-3 «Пихтовка»	430	-	176	-	-	181	132	158	227	238
KUZ-VTR-1-SDG-5 «Бобровая»	435	-	-	167	180	178	140	165	206	240
«Урочище Верхние Ворота»	483	-	-	-	-	-	-	205	266	337
«Ручей Серебряный»	717	-	-	-	-	-	-	220	250	275
KUZ-VTR-2-SDG-1 «Рыбное»	1029	-	387	408	-	369	238	265	452	420

Таблица 2. Динамика влагозапаса по 9 снегопунктам, в мм слоя воды

Снегопункт	Высота снегопункта, в м н.у.м.	Год								
		2011	2013	2014	2016	2017	2018	2019	2020	2021
«Кордон Соловей»	317	-	-	-	-	-	-	352	603	593
KUZ-VTR-1-SDG-2 «Кордон Верхняя Терсь»	319	702	525	-	-	410	386,4	438	728,9	761
KUZ-VTR-1-SDG-1 «Метеостанция»	398	640	505	553	1182	639,6	414,7	475	712,6	706,5
«Тундра»	400	598	486	-	-	-	-	321	695	650
KUZ-VTR-1-SDG-3 «Пихтовка»	430	-	-	-	-	278,8	343,2	539	834,3	600
KUZ-VTR-1-SDG-5 «Бобровая»	435	-	-	567	1341	219,6	420	507,5	814,9	608
«Урочище Верхние Ворота»	483	-	-	-	-	-	-	794	1042,2	1192
«Ручей Серебряный»	717	-	-	-	-	-	-	771	894	815
KUZ-VTR-2-SDG-1 «Рыбное»	1029	-	1498	1557	-	696	761,6	711	1801,5	1447

Высота снежного покрова и водозапас на западном макросклоне Кузнецкого Алатау напрямую зависят от абсолютной высоты снегопункта. От предгорий к осевому водоразделу с повышением высоты места увеличивается высота снежного покрова и водозапас в нем. В приводораздельной части выше абсолютных 1400 м н.у.м. высота снежного покрова резко уменьшается. На накопление снега здесь влияет метелевый перенос на подветренный склон, активность которого варьируется от года к году. В отдельные годы, снежный покров с гольцов полностью сдувается, обнажая каменные россыпи. Метелевый перенос с гольцов идет даже в ясную

погоду, притом на подветренных участках образуются надувы в виде узких параллельных гряд и ориентированные по направлению господствующих ветров (рис. 2). В водораздельной зоне, ближе к восточному макросклону, где расположена ГМС Ненастная высота снежного покрова существенно ниже, чем на западном. Высота снежного покрова на метеостанции Ненастная (поселок Приисковое, абс. высота 1178 м н.у.м.) – это всего лишь 15–18 % от высоты снежного покрова на снегопункте Рыбное (западный макросклон 1029 м н.у.м.) за аналогичный год, хотя расстояние между этими объектами по прямой всего 41 км.

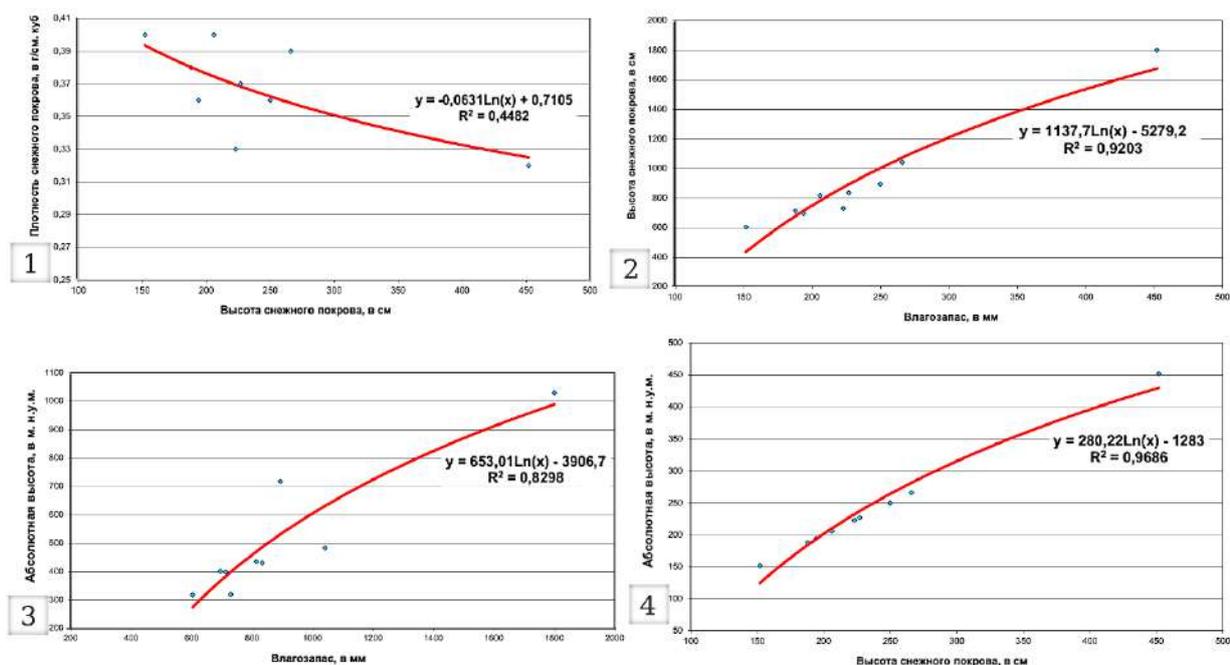


Рис.1. Взаимные математические зависимости показателей снежного покрова (по результатам снегосъемки 2020 года).

1 – зависимость плотности от высоты снежного покрова; 2 – зависимость влагозапаса в от высоты снежного покрова; 3 – зависимость влагозапаса в снежном покрове от абсолютной высоты расположения снегопункта; 4 – зависимость высоты снежного покрова от абсолютной высоты расположения снегопункта.



Рис. 2. Активизация метелевого переноса в гольцовой зоне 18 марта 2021 года

Средняя высота снежного покрова варьируется в зависимости от абсолютной высоты снегопункта, особенностей мезорельефа и других локальных факторов, в особенности – открытости территории. Коэффициент снегонакопления в среднем за три года составил 1,16, что указывает на метелевой перенос с открытых площадок. Снегозапасы в лесу больше, чем

на открытых участках. Наибольшая средняя высота снежного покрова в 260,2 см наблюдался в 2021 году. Наибольшая высота снежного покрова на отдельном снегопункте была зафиксирована на KUZ-VTR-2-SDG-1 «Рыбное» в 2020 году и составила 452 см. Среднее значение плотности снежного покрова за 2019–2021 гг. составляет 0,33 г/см<sup>3</sup>. Наибольшая сред-

няя плотность снежной толщи в 0,37 г/см<sup>3</sup> наблюдалась в 2020 году и обуславливалась, отчасти, выпадением дождей в период проведения снегосъемки. Наибольший средний влагозапас в 902,9 мм в слое воды был зафиксирован в 2020 году. Наибольший влагозапас в снежном покрове на отдельном снегопункте был зафиксирован на KUZ-VTR-2-SDG-1 «Рыбное» в 2020 году и составил 1801,5 мм.

Результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что количество осадков в горах Кузнецкого Алатау, значительно больше чем считалось ранее. В предыдущих публикациях производился анализ процентного распределения осадков по месяцам внутри года в горах Кузнецкого Алатау (Адаменко, Гутак, Треньков, 2021). За холодный период года (с ноября по март) выпадает около 40 % от годовой суммы, в то время, как в теплый период с апреля по октябрь выпадает 60 %. Таким образом, расчетным методом можно предположить, что годовое количество осадков в 2020 году могло достигать 3000 мм в год и более. Таким образом, подтверждается мнение Петра Сергеевича Шпиня, который еще в 70-х годах 20 века утверждал, что максимальная величина годового количества осадков в горах

Кузнецкого Алатау, в отдельные годы достигает 3000-3500 мм и более (Шпинь, 1975).

### Литература

1. Адаменко М.М., Гутак Я.М., Треньков И.П. Изменения внутригодового распределения осадков и динамика снежности в горах Кузнецкого Алатау // Геосферные исследования. 2021. № 2. С. 101–109.
2. Быков Н.И., Попов Е.С. Наблюдения за динамикой снежного покрова в ООПТ Алтае-Саянского эко-региона. Методическое руководство. Красноярск, 2011. 64 с.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 15: Алтай и Западная Сибирь. Вып 2: Средняя Обь. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 407 с.
4. Шпинь П.С. Некоторые вопросы современного оледенения Кузнецкого Алатау // Вопросы географии Кузбасса и горного Алтая. Новокузнецк, 1971. Вып. 4. С. 155–173.
5. Шпинь П.С. О снежном покрове и количестве осадков в южной части Кузнецкого Алатау // Гляциоклиматология Западной Сибири. Ленинград, 1975. С. 74–88.

## СОСТАВ ВОЗДУХА НАД МОРСКИМИ АКВАТОРИЯМИ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ

П.Н. Антохин, О.Ю. Антохина, В.Г. Аршинова, М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан, С.Б. Белан,  
Д.К. Давыдов, Г.А. Ивлев, А.В. Козлов, Т.М. Рассказчикова, Д.Е. Савкин, Д.В. Симоненков,  
Т.К. Складнева, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия, bbd@iao.ru*

В 2020 году проведен уникальный эксперимент, который не осуществлялся ни в бывшем СССР, ни в современной России. На самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» выполнено зондирование состава воздуха за короткий период (4–17 сентября) над всеми морями и прибрежными районами Российского сектора Арктики и Беринговым морем. В ходе полетов измерялась концентрация CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, аэрозоля и сажи. Отобраны пробы воздуха для определения в составе аэрозольных частиц органических и неорганических соединений и биоаэрозоля. С помощью лидара ЛОЗА-2 выполнено зондирование мутности верхнего слоя океана и определение концентрации в нем планктона. С помощью спектрорадиометра измерены спектральные характеристики водной и подстилающей прибрежной поверхности.

*Ключевые слова: Арктика, самолётное зондирование, парниковые газы, аэрозоль*

In 2020, a unique experiment, which had ever been implemented either in the former USSR or in modern-day Russia, was carried out in the Russian Arctic by means of the Optik Tu-134 aircraft laboratory operated by IAO SB RAS. The airborne measurement campaign was conducted on September 4–17 over all seas and coastal regions of the Russian sector of the Arctic, including northern part of the Bering Sea. During the flights, in situ measurements of CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, aerosols, and black carbon (BC) were performed. Air samples were taken to determine organic and inorganic compounds and biological material in aerosol particles. A remote sensing of the water turbidity in the upper sea layers was conducted by means of the LOZA-2 lidar that allowed a concentration of plankton to be derived there. Spectral characteristics of the water and underlying coastal surfaces were measured using a spectroradiometer.

*Key words: Arctic, airborne measurement, greenhouse gases, aerosol*

Атмосфера Арктики, как объект исследования, была выбрана, что скорость роста температуры воздуха в этом регионе в 4–5 раза выше, чем над другими регионами (Shepherd, 2016, Johannessen, 2016). Потепление сказывается на деградации многолетней мерзлоты (Vsailiev, 2020), на биоте (Miles, 2019, Berner, 2019). В прибрежных районах увеличивается количество озер и возрастает выделение метана из них (Голубятников, 2018). Повышается уровень океана и затапливает прибрежные районы (Hamlington, 2020). Потепление в Арктике уже сказывается на изменении инфраструктуры, экономики и культуре людей живущих здесь (Moon, 2019). В связи с этим встают закономерные вопросы: как потепление в Арктике влияет на состав воздуха и как соотносится с поступающими в регион примесями? Ответить на эти вопросы, также как и наметить план мероприятий по сохранению уязвимой природы Арктики, можно только на основании данных измерений и анализа прямых и обратных связей между

потеплением климата и изменением состава воздуха (Kulmala, 2010).

Для восполнения пробела в данных о вертикальном распределении газового состава воздуха над Российским сектором Арктики было выполнено в сжатые сроки на УНУ самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» (Анохин, 2011) зондирование атмосферы над акваториями всех морей Ледовитого океана: Баренцовым, Карским, Лаптевых, Восточно-Сибирским и Чукотским, а также над Беринговым морем Тихого океана. В настоящем сообщении приводятся данные о вертикальном распределении газовых компонентов воздуха над акваториями перечисленных морей.

Схема маршрута всего эксперимента приведена на рис. 1. Были получены профили измеряемых величин от минимально допустимых высот (красные и др. теплые тона траекторий на карте-схеме) до верхней тропосферы (фиолетовые тона траекторий на карте-схеме).

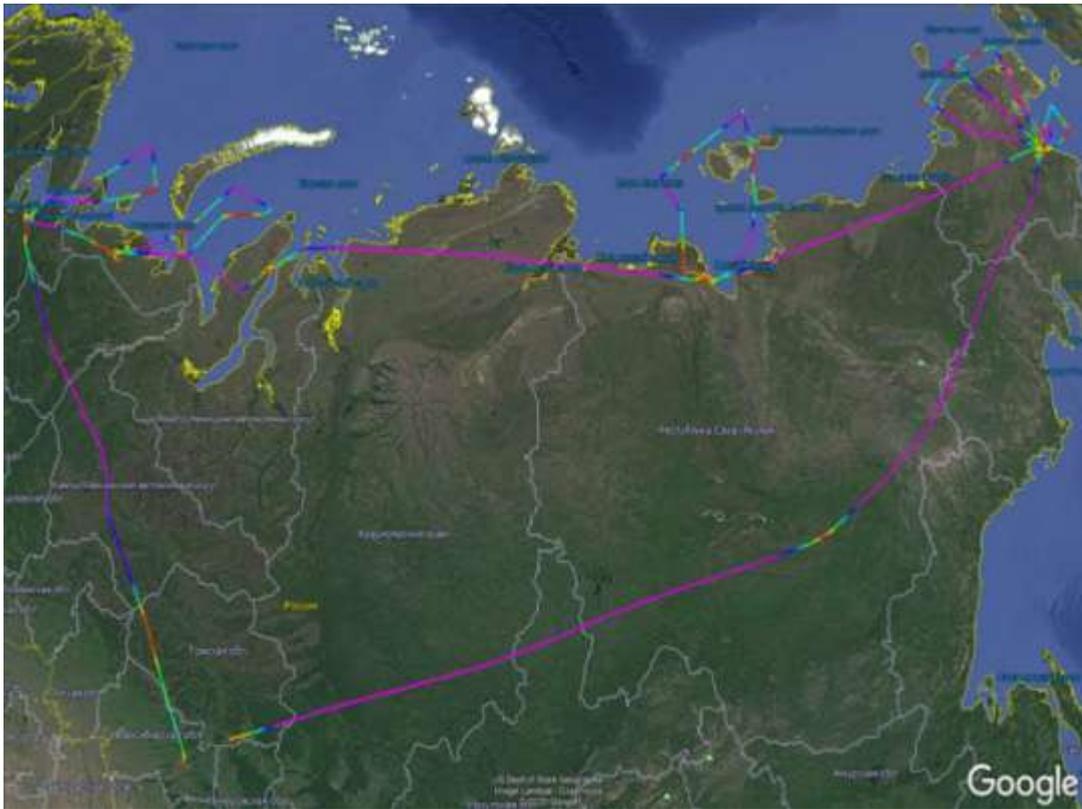


Рис. 1. Схема маршрута арктического полёта

Основным газом, вносящим наибольший вклад в современное потепление климата является  $\text{CO}_2$ . Данные о его вертикальном распределении приведены на рис. 2.

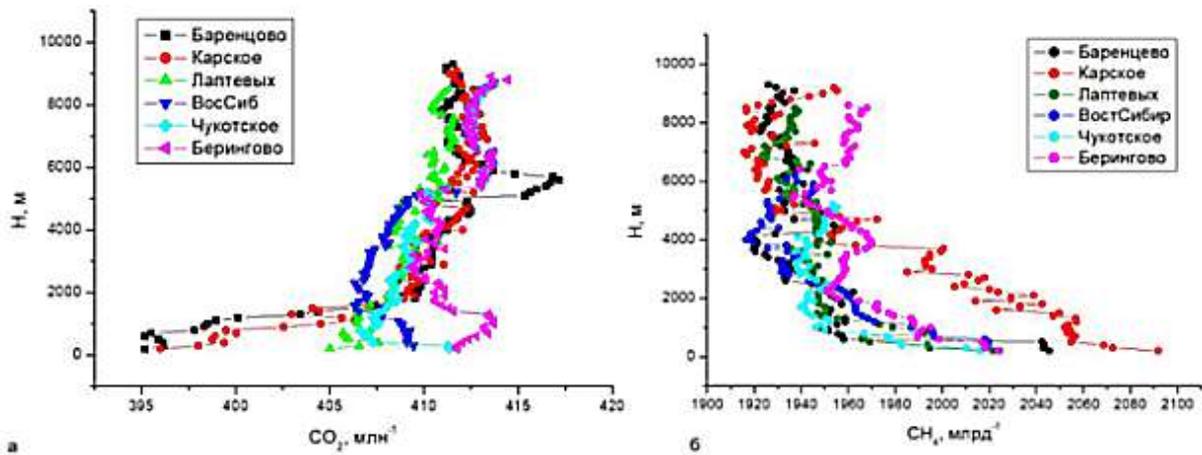


Рис. 2. Вертикальное распределение концентрации: а) углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ); б) метана ( $\text{CH}_4$ )

Из рис. 2 а видно, что в нижней части профилей, относящихся у пограничному слою атмосферы (ПСА), концентрация углекислого газа минимальна. При этом, хорошо заметна разница в стоке  $\text{CO}_2$  над разными морями. Если ее оценивать по различию концентраций на верхней границе ПСА и на уровне 200 метров от поверхности воды, то она наибольшая над Баренцевым и Карским морями. Здесь она достигает величины 14 млн-1. Для моря Лаптевых и Чукотского она значительно меньше и составляет 4 млн-1. У Восточно-Сибирского моря концентрация даже растет в по-

граничном слое. Однако это обусловлено переносом с материка.

Следующим, по вкладу в радиационный форсинг, является метан. Причем в последнее время по поводу роста его концентрации в Арктике развернулась большая дискуссия. В (Turetsky, 2020) рассматривается возможный взрывной характер поступления метана при нагревании многолетней мерзлоты. Согласно же последнему обзору о бюджете метана на планете (Saunois, 2020), такой источник упоминается. Однако он не является значимым. Семилетова И.П. предлагается обратить

внимание на разложение газогидратов и выход метана в больших количествах в условиях потепления климата. Это явление зафиксировано им с коллегами в ходе измерений на морских судах (Shakhova, 2015, Sapart, 2017). При этом, не все согласны с оценкой Семилетовым масштаба угрозы от разложения газогидратов. Данные измерений (Berchet, 2016) не выявляют значимых потоков метана из океана, но зафиксировали его перенос с суши на акваторию океана. Поэтому этому газу в эксперименте было уделено особое внимание (рис.2 б).

Данные, приведенные на рис. 2 б показывают, что над всеми Арктическими морями наблюдаются повышенные концентрации метана. Причем распределение

содержания  $\text{CH}_4$  над ними обратно, по отношению к  $\text{CO}_2$ . Так, наименьшие концентрации углекислого газа наблюдались в приводном слое над Карским и Баренцевым морями. У метана, наоборот, здесь зафиксированы наиболее высокие концентрации 2092 и 2071 млрд-1, соответственно. Над остальными прозондированными морями содержание метана в приводном слое почти одинаково и составляет 2018–2022 млрд-1. В свободной атмосфере концентрации метана над всеми морями мало различаются между собой и лежат в пределах 1920–1960 млрд-1. Остальные измеренные газы особых распределений концентрации по вертикали не выявили, что видно из рис. 3.

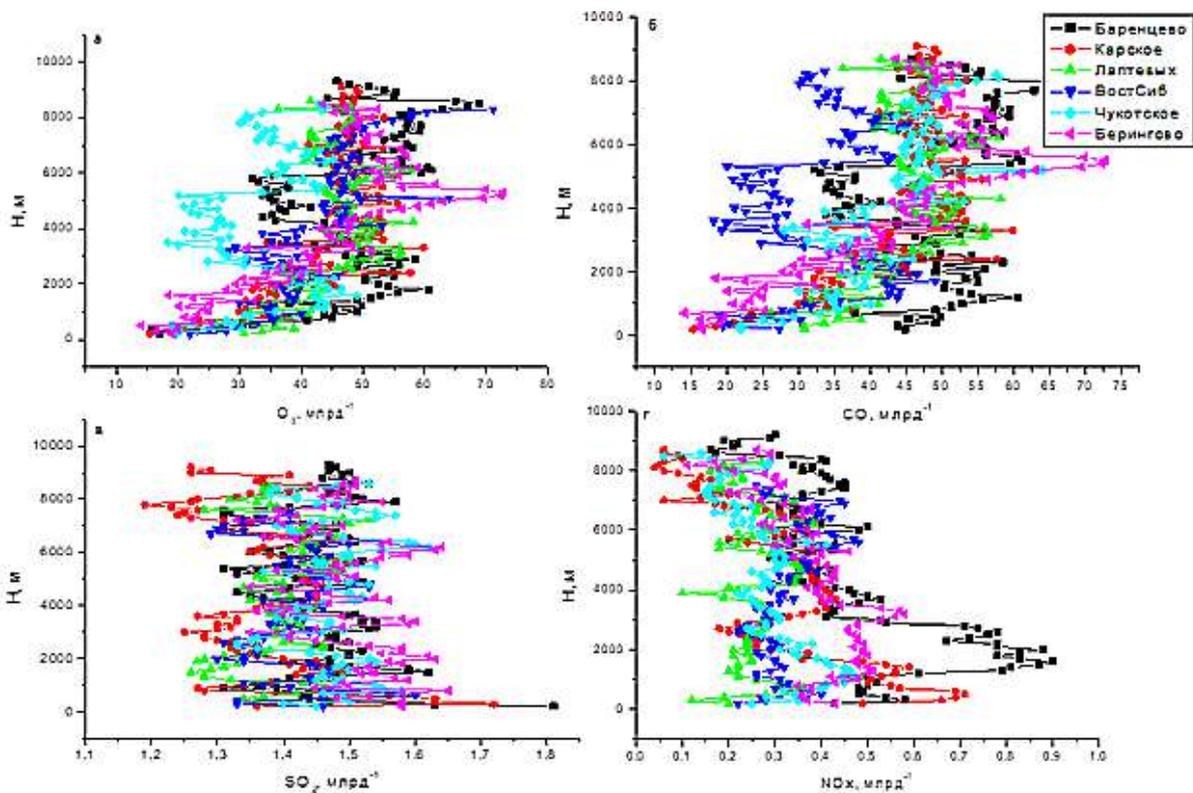


Рис.3. Вертикальное распределение концентрации: а) озона ( $\text{O}_3$ ); б) угарного газа ( $\text{CO}$ ); в) сернистого ангидрида ( $\text{SO}_2$ ); г) оксидов азота ( $\text{NO}_x$ )

Из рис. 3 видно, что концентрация озона в приводном слое резко уменьшается над всеми морями. Поскольку  $\text{O}_3$  относится к нерастворимым газам, в отличие от  $\text{CO}_2$ , то это эффект не поглощения его океаном, а отсутствие его фотохимического образования. Данные собранные на рис. 4 показывают, что концентрация  $\text{CO}$  находилась в пределах 15–75 млрд-1 в период эксперимента и была близка к фоновым значениям. Концентрации  $\text{SO}_2$  (рис. 4) лежат в пределах 1.2–1.8 млрд-1,  $\text{NO}_x$  (рис. 4) в диапазоне 0,02–0,90 млрд -1 и 3.10 близки к порогам регистрации используемых приборов.

Таким образом, региональные особенности в вертикальном распределении проявляют только  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Концентрации остальных измеренных газов близки к фоновым значениям.

### Литература

1. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю. и др. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик». // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 09. С. 805–816.
2. Голубятников Л.Л., Маммарелла И. Потоки метана в атмосферу из озер Фенноскандинавии // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018, Т.54, №6, С. 672–683.
3. Berchet A., Bousquet P., Pison I., et.al. Atmospheric constraints on the methane emissions from the East Siberian Shelf // Atmos. Chem. Phys., 2016, V.16, N6, pp. 4147–4157.
4. Berner L. T., Massey R., Jantz P., et.al. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome // NATURE COMMUNICA-

- TIONS, 2020. V.11:4621.
5. Johannessen O.M., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Miles M.W. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: new amplification assessment and regionalisation // *Tellus*. 2016, V. 68, 28234, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.28234>.
  6. Hamlington B.D., Gardner A.S., Ivins E., et.al. Understanding of Contemporary Regional Sea Level Change and the Implications for the Future // *Rev. Geophys.*, 2020, V.58, N3, e2019RG000672.
  7. Kulmala M., Nieminen T., Chellapermal R., et.al. Climate feedbacks linking the increasing atmospheric CO<sub>2</sub> concentration, BVOC emissions, aerosols and clouds in forest ecosystems // In: Niinemets U. & Monson R.K. (eds.), *Biology, controls and model tree volatile organic compound emissions*. Springer, Dordrecht, 2010, pp. 489–508.
  8. Miles M.W., Miles V.V., Esau I. Varying climate response across the tundra, forest-tundra and boreal forest biomes in northern West Siberia // *Environ. Res. Lett.*, 2019, V.14, 075008.
  9. Moon T. A., Overeem I., Druckenmiller M., et.al. The expanding footprint of rapid Arctic change // *Earth's Future*. 2019, V.7, n3, pp. 212–218.
  10. Saunio M., Stavert A.R., Poulter B., et.al. The Global Methane Budget 2000–2017 // *Earth Syst. Sci. Data*, 2020, v.12, N2, pp.1561–1623.
  11. Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I.P., et.al. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis // *Biogeosciences*. 2017, V.14, N9, p.2283–2292.
  12. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., et.al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice, *Philos. T. Roy. Soc. A*, 2015, V.373, 20140451, doi:10.1098/rsta.2014.0451.
  13. Shepherd T.G. Effects of a warming Arctic // *Science*. 2016, v. 353, №6303, p.989-990.
  14. Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., et.al. // *Nature Geoscience*. 2020, V.13, 138.
  15. Vsailiev A.A., Drozdov D.S., Gravis A.G., et. al. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic // *Environ. Res. Lett.*, 2020, V.15, 045001.

УДК 551.553.6

## **ХАРАКТЕРИСТИКА РЕЖИМА ВЕТРА НА ТЕРРИТОРИИ БОЛЬШОГО ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ТЕРРИТОРИИ В ПЕРИОД ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

**Х.Т. Апостолиди, М. В. Гришаев\***

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия,  
\*mishagrishaev@gmail.com*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 p\_a.

Рассмотрены характеристики ветрового режима (средние месячные и годовые значения средней и максимальной скорости ветра, тенденции изменения за периоды 1976–2019 и 2010–2019 гг, повторяемость направления ветра) на станциях в пределах Васюганского болота и прилегающей территории. Отмечается снижение средней годовой скорости ветра, как в целом за период (1976–2019), так и в период с повышенной повторяемостью местных циклонов (2010–2019 гг.). При этом в последнее десятилетие отмечается рост средней скорости ветра в отдельные месяцы, а на станции Бакчар наблюдается тенденция повышения средней годовой скорости. В весенне-летние месяцы (март, июль, август) наблюдаются тенденции к увеличению максимальной скорости ветра, усиливающиеся в последнее десятилетие.

*Ключевые слова:* местные циклоны, Большое Васюганское болото, средняя и максимальная скорость ветра.

The characteristics of the wind regime (average monthly and annual values of the average and maximum wind speed, trends of change for the periods 1976–2019 and 2010–2019, frequency of wind direction) are considered at the stations within the Vasyugan swamp and adjacent territory. A decrease in the average annual wind speed is noted both in general for the period (1976–2019) and in the period with increased frequency of local cyclones (2010–2019). At the same time, in the last decade, there has been an increase in the average wind speed in certain months, and at Bakchar station there is a tendency to an increase in the average annual speed. In the spring-summer months (March, July, August), there are tendencies towards an increase in the maximum wind speed, which have been increasing in the last decade.

*Key words:* local cyclones, Vasyugan swamp, average and maximum wind speed.

Современное увеличение содержания парниковых газов в атмосфере Земли способствует потеплению климата, которое оказывает влияние на природные

системы. В ответ происходят изменение свойств этих систем и, возникает обратное воздействие на состоящие атмосферы и всей климатической системы Земли.

Эти процессы характерны и для Западной Сибири – для междуречья Обь-Иртыш. Уникальный природный объект – Большое Васюганское Болото (БВБ) – не только является объектом воздействия глобального изменения климата, но и способно в значительной мере формировать местные особенности климата и его изменений в ответ на сигнал глобального потепления – температурно-влажностного режима и вихревой активности атмосферы, включая местный циклогенез (Горбатенко и др., 2020). Над этой территорией образуется около 20% всех циклонов, определяющих погоду региона. С 2008 года наблюдается существенное увеличение местного циклогенеза (Тунаев и др., 2017), что может способствовать изменению ветрового режима на территории.

Цель работы заключается в изучении характеристик ветра на территории Большого Васюганского болота и прилегающей территории в период глобального изменения климата. Рассматривались средние месячные и годовые значения средней и максимальной скорости ветра, тенденции изменения за периоды 1976–2019 и 2010–2019 гг., повторяемость направления ветра различных румбов.

Информационной базой послужили данные срочных метеорологических наблюдений (Всероссийский..., 2020) на станциях Бакчар, Средний Васюган, Первомайское, Пудино, Колпашево, Барабинск, Северное. Станции были выбраны на основании того, что они находятся в пределах Васюганского болота или прилегающей территории. Массив содержит срочные данные о ветре (направление, скорость, максимальная скорость) за 1976 по 2019 г.

Исследование показало, что за рассмотренный период средняя скорость ветра на территории составила от 2,2 (ст. Первомайское) до 3,4 м/с (ст. Барабинск). Вариативность (стандартное отклонение) составило 0,2 м/с (ст. Средний Васюган) – 0,5 м/с (ст. Колпашево).

В годовом ходе максимумы скорости ветра (до 3,8 м/с) наблюдаются преимущественно в весенний (март–апрель) период и с октября по декабрь, что обусловлено более активными циклоническими процессами. Минимумы средней скорости прослеживаются в летнее время года (июль–август), составляют 1,4 ÷ 2,8 м/с и обусловлены малыми значениями барических градиентов по сравнению с холодным периодом.

В суточном ходе наибольшие значения средней скорости (3,5–4,9 м/с) наблюдаются в срок 9:00 СГВ (16 ч ПДВ), что связано с усилением конвективных движений за счет прогрева подстилающей поверхности. Минимальные скорости (0–2 м/с) фиксируются в сроки 21±00 ч СГВ (4–7 ч. ПДВ) Наиболее высокие скорости в суточном ходе и суточная амплитуда прослеживались в апреле.

За период 1976–2019 гг. средняя годовая скорость имеет тенденция к снижению, скорость изменения составила  $-0,1 \div -0,3$  м/с/10 лет, исключение составила ст. Барабинск, где изменение наиболее заметное (со скоростью  $-0,8$  м/с/10 лет). В отдельные месяцы отмечается тенденция к снижению скорости ветра со значениями

до  $-0,5$  м/с/10 лет, наибольшие значения скорости снижения фиксируются в холодный период. На станциях Средний Васюган и Бакчар тенденции незначительные, скорость изменения лежит в пределах  $\pm 0,2$  м/с/10 лет.

В последнее десятилетие 2010–2019 гг. (период с повышенным местным циклогенезом) тенденция уменьшения средней скорости ветра сохраняется на большинстве станций, при этом, на станции Бакчар наблюдается тенденция повышения средней годовой скорости (0,2 м/с/10 лет). В годовом ходе тенденции изменения неоднозначные, так, в зимние месяцы почти всех станциях видна тенденция к увеличению скорости ветра до 1 м/с/10 лет (ст. Бакчар, январь), кроме станции Барабинск, где происходит снижение до  $-5,0$  м/с/10 лет. Помимо этого, на станциях Бакчар, Средний Васюган и Первомайское в весенне-летний период наблюдается тенденция увеличения средней скорости ветра до 0,5 м/с/10 лет.

Средние значения максимальной скорости ветра за 1976–2019 гг. составили от 19,7 м/с (ст. Колпашево) до 22,6 м/с (ст. Барабинск). Стандартное отклонение составило 2,7 м/с (ст. Средний Васюган) – 4,6 м/с (ст. Барабинск). Абсолютные максимумы скорости ветра достигали  $35 \div 40$  м/с. В годовом ходе наибольшие скорости ветра достигались в период с марта по май, а на станции Колпашево и Барабинск – в декабре.

Рассматривая тенденции изменения средней максимальной скорости (за год) за период 1976–2019 гг., следует отметить снижение скорости ( $-0,4 \div -1,8$  м/с/10 лет) на станциях Средний Васюган, Первомайское, Пудино, Колпашево и Северное. На станциях Бакчар и Барабинск происходит увеличение максимальной скорости до 4,2 м/с/10 лет (ст. Бакчар). При этом в годовом ходе снижение максимальной скорости фиксируется преимущественно в холодный период года, а в отдельные весенне-летние месяцы (март, июль, август) имеется тенденция к увеличению максимальной скорости ветра со значениями до 1,8 м/с/10 лет (ст. Бакчар, март).

За период 2010–2019 гг. наблюдается тенденция увеличения максимальной скорости ветра на станциях Средний Васюган, Пудино, Первомайское, Бакчар и Барабинск ( $0,5 \div 4,2$  м/с/10 лет), на станции Колпашево – изменение отсутствует, на станции Северное среднегодовая максимальная скорость уменьшается ( $-1,8$  м/с/10 лет). В годовом распределении тенденция увеличения максимальной скорости ветра наблюдается преимущественно в летние и осенние месяцы, а на станциях Колпашево, Северное, Бакчар, Барабинск – и в отдельные зимние месяцы. Тенденции к уменьшению максимальной скорости ветра прослеживаются преимущественно в зимний период года (декабрь и февраль) и весенние месяцы, но значения скорости изменения статистически незначимые.

Преобладающим направлением ветра на всех станциях за период является юго-западное  $200\text{--}220^\circ$ , наиболее редкое – северо-северо-восточное. Повторяемость штиля составила от 3 % (ст. Бакчар) до 20% (ст. Северное). Повторяемость переменного ветра не превышает 2 %.

В заключение следует отметить, что выявленные тенденции изменения средней и максимальной скорости ветра в последнее десятилетие, в целом согласуются с тенденциями повышения повторяемости циклонов над рассмотренным районом.

### Литература

1. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/date>. (дата обращения 10 ноября 2020).
2. Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л., Волкова М.А., Пустовалов К.Н., Нечепуренко О.Е. Изменение циклогенеза над западной Сибирью в 1976 – 2017 гг. // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020. Т. 2. С.35–37 с.
3. Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П., Поднебесных Н.В. Особенности циклогенеза над территорией Западной Сибири за период 1976–2015 гг. // *Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации*. 2017. № 364. С. 81–92.

УДК 556.166.4: 627.512

## ОБЪЕДИНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ И РЕЧНЫХ ВОДОСБОРОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПАВОДКОВ

А.Л. Ветров<sup>1</sup>, А.А. Тиунов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия, [vetrov@psu.ru](mailto:vetrov@psu.ru)*

<sup>2</sup>*ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, Пермь, Россия*

<sup>3</sup>*Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Пермь, Россия*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596031.

Изучен вопрос объединения региональной модели атмосферы WRF-ARW с гидрологической моделью RiverFlow 2D GPU с целью изучения дождевых паводков на р. Усьва (Средний Урал). Установлено, что использованием цифровой модели рельефа с большим разрешением увеличивает точность расчета максимальных расходов. Предложен метод предварительного усвоения данных об осадках гидрологической моделью для адекватного воспроизводства начальных условий расходов воды в нижней точке водосбора до прохождения паводка.

*Ключевые слова: паводки, моделирование, сильный дождь, WRF\_ARW, RiverFlow 2D GPU*

The issue of combining the WRF-ARW regional atmospheric model with the RiverFlow 2D GPU hydrological model is studied in order to study rain floods on the river Usva (Middle Urals). It is established that the use of a digital terrain model with a high resolution increases the accuracy of calculating the maximum discharge. A method of preliminary assimilation of precipitation data by a hydrological model is proposed for adequate reproduction of the initial conditions of water flow at the lower point of the catchment before the flood passes.

*Keywords: floods, modeling, severe rain, WRF\_ARW, RiverFlow 2D GPU*

По данным результатов всестороннего анализа, проведенного Всемирной метеорологической организацией, на протяжении последних 50 лет паводки вызвали 58 700 смертей по всему миру и нанесли экономический ущерб в размере 115 млрд долларов США. Наводнение 2002 г. в Германии причинило ущерб на сумму 16,48 млрд долларов США и стало самым разорительным явлением в Европе в период с 1970 по 2019 гг. Адекватным ответом на возникающие угрозы может быть модельно-ориентированный подход, обе-

спечивающий высокоточную оценку границ затоплений и уровней подъема воды с учётом конкретных условий распространения водного потока (Зеленцов и др., 2019), и своевременное информирование населения и служб о масштабах и времени наступающего бедствия.

Целью исследования было изучение возможности использования данных моделирования атмосферных процессов в качестве начальных данных гидрологической модели для расчета максимальных уровней на р. Усьва на Среднем Урале (рис. 1).

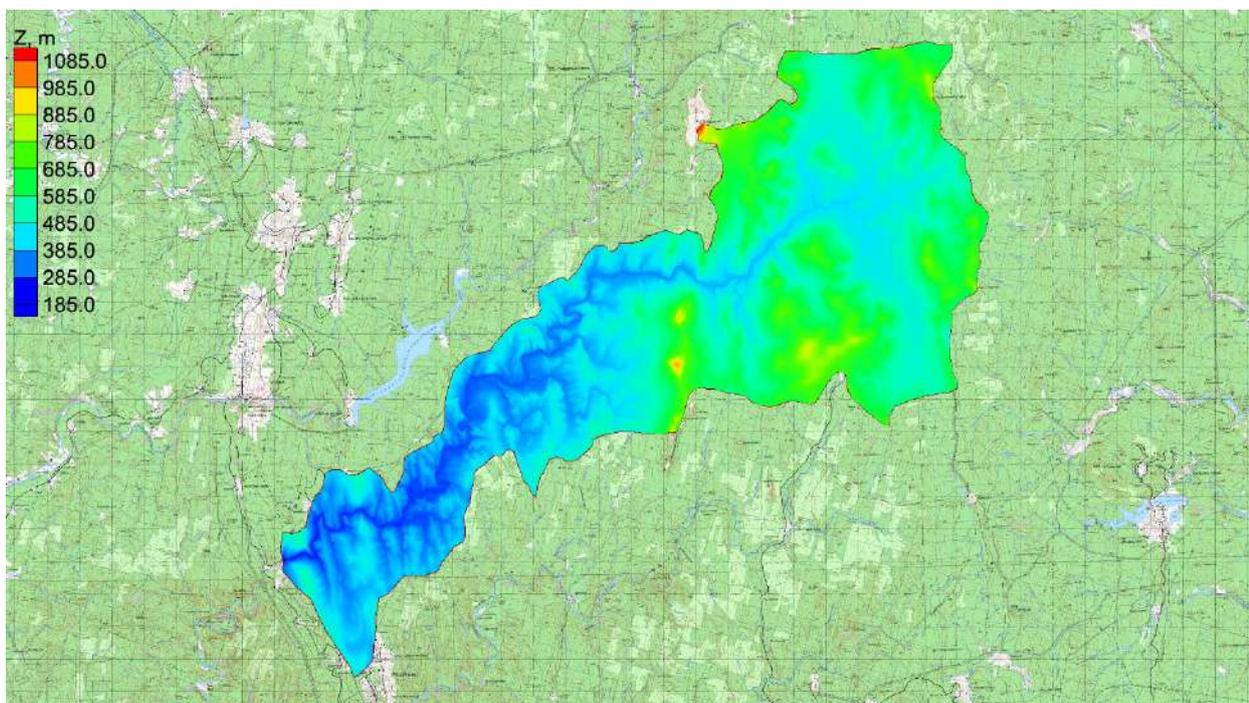


Рис.1. Цифровая модель рельефа водосборного бассейна р. Усьва до створа гидрологического поста Усьва (средний шаг ребра сетки 60,4 м).

Для моделирования полей осадков использовался программный комплекс WRF (версия 3.9.1.1) с динамическим ядром ARW, установленный на суперкомпьютере «ПГНИУ-Кеплер». Для получения начальных и граничных условий использовались данные реанализа NCEP-GFS и NCEP-CFS (США), представленные в коде GRIB-2. В ходе исследования было проанализировано один случай очень сильных осадков (22 июня 2005 г.). При этом использовалось негидростатическое приближение и прямое (без параметризаций) моделирование конвекции. Счет модели проводился с продолжительностью 27 ч, начиная с 00 ч ВСВ.

Расчет расходов воды проводили с использованием модели в среде RiverFlow 2D GPU (Reference..., 2016).

Для исследования использовалось два вида треугольной нерегулярной сетки с различной средней длиной ребра – 66,4 м и 30 м. Площадь моделируемой земной поверхности на местности составила 2230 км<sup>2</sup>, изменение по высоте от 196,5 до 1094,1 м балтийской системы. Дополнительные характеристики вынесены в таблицу (табл. 1).

Подготовка цифровой модели рельефа (ЦМР) и разграничение водосборного бассейна р. Усьва для проведения гидрологических расчетов производилась в приложении ArcMAP 10.4 с помощью группы инструментов «Гидрология» из набора инструментов «Spatial Analyst» с использованием трехмерных снимков SRTM (Shuttle radar topography mission) с сайта <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>. В нашем случае это был файл растровых данных размерами 5 x 5 градусов «srtm\_48\_01.tif» в географической системе координат WGS-84 с границами: нижняя – 55° с.ш., верхняя – 60° с.ш., левая и правая – 55° и 60° в.д., соответственно.

Для моделирования стока были использованы модельные данные о количестве осадков за 12 ч (с 15 ч МСВ 21 июня до 03 ч МСВ 22 июня). На нижней границе модели по створу гидрологического поста Усьва ставилось условие свободного вытекания воды. При моделировании стока, испарение и инфильтрация почвы не учитывались. В результате расчета был получен гидрограф расхода воды по створу гидрологического поста Усьва (рис. 2).

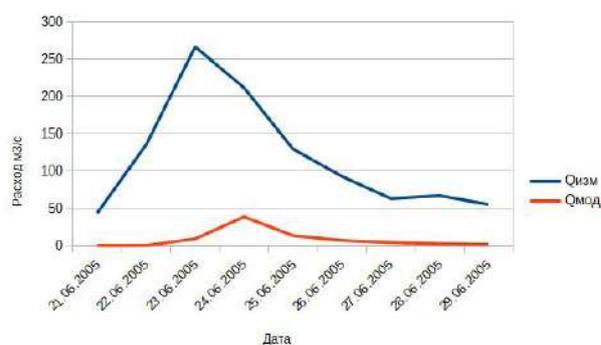


Рис. 2. Расчетный гидрограф расхода воды по створу поста Усьва, для ЦМР с шагом сетки 66,4 м

Расчетный среднесуточный расход воды на пике паводка составил 39,1 м<sup>3</sup>/с, на 24 июня 2005 г, примерно в 6,5 раз меньше измеренного расхода воды на пике  $Q_{изм.} = 267$  м<sup>3</sup>/с 23 июня 2005 г., по данным с сайта <http://gis.vodinfo.ru/> («Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России»). В связи с низким качеством моделирования была изменена цифровая модель рельефа. Для этого была построена ЦМР с использованием свободно

распространяемых топографических карт масштаба 1:100000. Полученная ЦМР после оцифровки данных карт и обработки в приложении ArcMap имела усреднённый размер ячеек по вертикали и по горизонтали порядка 30 м.

Расчетный среднесуточный расход воды на пике паводка составил 128,9 м<sup>3</sup>/с на 23 июня 2005 г. - это точно в дату паводка, но в 2 раз меньше измеренного значения (рис. 3).

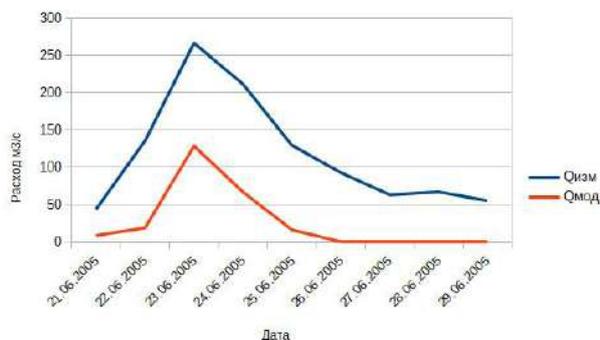


Рис. 3. Расчетный гидрограф расхода воды по створу поста Усьва, для ЦМР с шагом сетки 30 м

Сравнение расчетных расходов воды по моделям с разным размером ребра расчетной сетки показывает возрастание среднесуточного расхода воды на пике в 3,2 раза для сетки с меньшим шагом.

Преыдушие две модели не учитывали присутствие какого-либо первоначального течения воды в ложе реки. Для повышения точности моделирования в начальные данные модели в ложе водотока было добавлено условие наличия текущей воды. Сама модель RiverFlow 2D GPU не имеет функции обводнения водотока. В нашем случае это было сделано путем предварительного моделирования выпадения осадков таким образом, чтобы при начале расчета паводка (22 июня) величина расхода воды в нижней точке водосбора была равна 48 м<sup>3</sup>/с (это соответствует измеренным на посту Усьва значениям). При предварительном усвоении данных об осадках расчетный среднесуточный расход воды на пике составил 178 м<sup>3</sup>/с на 23 июня, что на 43 % меньше измеренного расхода (рис. 4).

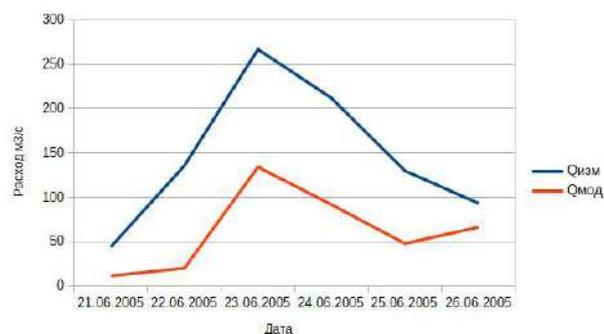


Рис. 4. Расчетный гидрограф расхода воды по створу поста Усьва, для ЦМР с шагом сетки 30 м и с учетом первоначального течения

В ходе исследования установлено:

- на точность расчета расхода воды в р. Усьва моделью RiverFlow 2D GPU оказывает значительное влияние качество ЦМР водосборного бассейна реки. Использование ЦМР с меньшим шагом сетки приводит к увеличению точности расчета движения воды по водосбору и точности распространения паводочной волны;

- предварительное усвоение данных об осадках в модели RiverFlow 2D GPU позволяет также увеличить точность расчета расходов воды.

- совместное использование региональной модели атмосферы WRF-ARW и RiverFlow 2D GPU занижает максимальные среднесуточные расходы воды.

При дальнейшей настройке моделей требуется учесть неравномерность выпадения количества осадков по водосборному бассейну, в том числе используя выходную информацию глобальных моделей атмосферы.

### Литература

1. Зеленцов В.А. и др. Модельно-ориентированная система оперативного прогнозирования речных наводнений // Вестник РАН. 2019, том 89, №8. С. 831–843.
2. Reference Manual «RiverFlow2D Two-Dimensional River Dynamics Model» August, 2016, Hydronia LLC. Режим доступа: <http://www.hydronia.com> (дата обращения: 24.05.2018).

## ЯВЛЕНИЯ ПОГОДЫ, УХУДШАЮЩИЕ ВИДИМОСТЬ НА ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН

О.В. Волобуева, О.Н. Топтунова

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия,  
ovvolobueva@ramble, olgakolp@yandex.ru*

В статье рассмотрены явления погоды, ухудшающие видимость на территории Республики Башкортостан, синоптические процессы, вызывающие эти явления. Также представлены результаты исследований южных циклонов, перемещающихся через территорию республики, места их зарождения и траектории перемещения. Данный процесс вызывает особый интерес, учитывая географическое положение Республики Башкортостан, по востоку которой в меридиональном направлении расположены Уральские горы.

*Ключевые слова: видимость, опасные явления погоды, южные циклоны, Республика Башкортостан, синоптическая ситуация*

The article discusses weather phenomena that worsen visibility on the territory of the Republic of Bashkortostan, synoptic processes that cause these phenomena. The results of studies of southern cyclones moving through the territory of the republic, their places of origin and trajectories of movement are also presented. This process is of particular interest, given the geographical position of the Republic of Bashkortostan, in the east of which the Ural Mountains are located in the meridional direction.

*Keywords: visibility, dangerous weather phenomena, southern cyclones, Republic of Bashkortostan, synoptic situation*

Влияние погодных условий на отрасли экономики и население невозможно оценить. Зависимость от метеорологических условий ощущают все без исключения сферы человеческой деятельности. Экономическую же сферу также невозможно представить без полных и точных данных о текущей и предстоящей погоде. При этом грамотные решения, принимаемые своевременно могут предотвратить влияние неблагоприятных условий погоды на отрасли экономики, многие из которых являются погодозависимыми. Это, например, все виды транспорта (автомобильный, речной, морской, железнодорожный, авиационный), дорожные службы, коммунальное хозяйство, строительство, энергетика, сельское хозяйство и др.

В различных отраслях решаются такие задачи, как экономия энергоресурсов, сокращение простоя транспорта, повышение урожайности сельхозкультур и т.д. Степень зависимости потребителя от условий погоды (будь это конкретная отрасль, вид производства или отдельные работы) определяет спрос на определенный вид метеоинформации. Это могут быть конкретные параметры, конкретные явления или комплексы метеорологических величин и явлений и др. (Лапина, Алимбиева, 2020).

Под видимостью понимается максимальное расстояние, с которого видны и опознаются не освещен-

ные объекты днем и световые ориентиры ночью. Теоретическое максимальное значение видимости равно 350 км, реальная же видимость очень редко достигает 200 км. Минимальная видимость в некоторых метеорологических явлениях не превышает нескольких метров, однако именно эта ограниченная видимость особенно интересует пользователей метеорологической информации.

Республика Башкортостан расположена на западных склонах Южного Урала и в Предуралье, протяженность с севера на юг 550 км, с запада на восток – 430 км. На рис. 1 представлена достаточно обширная сеть метеостанций Башкирского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Башкирское УГМС). С учетом большей протяженности в меридиональном направлении, а также рельефа (на востоке республики расположены Уральские горы) синоптические процессы и явления погоды, связанные с ними в разных частях республики, имеют существенные отличия (Волобуева, Горохольская, 2006). Поэтому для исследования были выбраны данные об ухудшении видимости на 4-х метеостанциях (м/с) в различных районах Республики Башкортостан: на севере (м/с Аскино), на юге (м/с Акъяр), на западе (м/с Туймазы), на востоке (м/с Учалы) за период 2018–2020 гг.

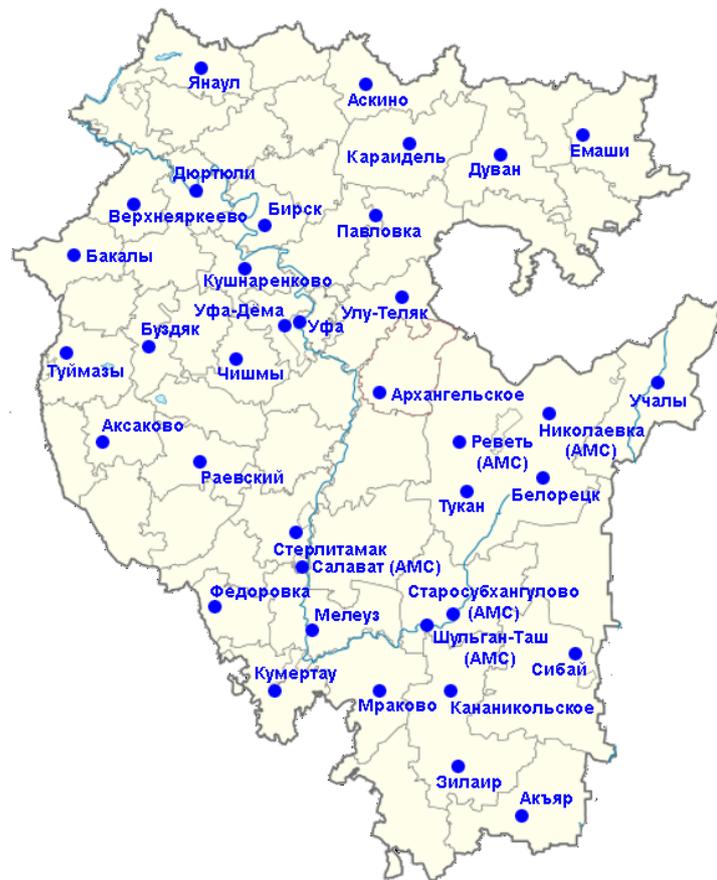


Рис. 1. Карта сети метеостанций Башкирского УГМС

Таблица 1. Количество явлений, ухудшающих видимость по данным метеостанций за период 2018–2020 гг.

Метеостанция	Туман	Сильный дождь или ливень (15–49мм /12ч и менее)	Сильный снег (6–19мм/12ч)	Морось непрерывная, умеренная	Метель (общая, низовая)	Итого явлений
Туймазы (запад)	22	17	174	1	4	218
Акъяр (юг)	42	21	152	0	8	223
Аскино (север)	39	1	112	12	12	176
Учалы (восток)	37	0	38	0	1	76

Как видно из Таблицы 1 самое часто встречающееся явление, ухудшающее видимость на территории Республики Башкортостан - сильный снег (в период с декабря по март). Причем повторяемость данного явления существенно больше по всех частях республики, кроме восточной (Зауралье). Объясняется это тем, что расположенные в меридиональном направлении Уральские горы препятствуют проникновению барических образований и связанных с ними осадков на восточные окраины республики (Гороховская, Волобуева, 2006). Также можно выделить метеостанцию Туймазы, расположенную на западе республики и метеостанцию Акъяр (южная часть республики), где было зафиксировано самое большое количество

случаев ухудшения видимости (218 и 223 соответственно).

Проанализировав синоптические ситуации, при которых наблюдались явления погоды, ухудшающие видимость, можно выделить наиболее часто встречающиеся (рис. 2): теплый фронт (16 %), тыловая часть ложбины (14 %) и центр циклона (13 %) (Волобуева и др., 2020).

Для более подробного анализа синоптических ситуаций, вызывающих ухудшение видимости было рассмотрено влияние южных циклонов, выходящих на территорию Республики Башкортостан. В Таблице 2 представлены районы их зарождения, а на рис. 3 траектории перемещения через территорию республики.

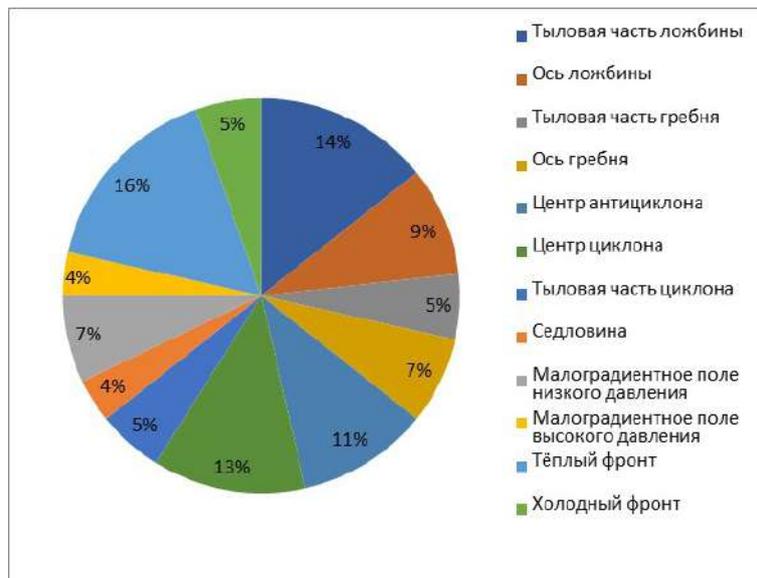


Рис. 2. Повторяемость синоптических ситуаций при ухудшении видимости по данным метеостанций Республики Башкортостан

Таблица 2. Районы зарождения «южных» циклонов, перемещающихся на территорию Республики Башкортостан

Территория зарождения	Средиземное море	Адриатическое море	Чёрное море	Каспийское-море	Аральское море
Над морем	3	1	9	6	1
На побережье	2	1	6	1	0
Итого	5	2	15	7	1

За период 1993–2018 гг. было определено 3 преобладающих типа трекинга (Волобуева и др., 2021):

1-й тип – «Северные ворота» (термин, применяемый синоптиками Башкирского УГМС) Циклон, проходя через территорию республики, покидает ее в северо-восточной части;

2-й тип – стационарирование и заполнение циклона на территории республики;

3-й тип – перемещение циклона вдоль Уральских гор на север.



Рис. 3. Перемещение циклонов по территории Республики Башкортостан:

1 – «Северные ворота»; 2 – заполнение циклона на территории республики; 3 – перемещение циклона вдоль Уральских гор на север

Как уже говорилось выше, Уральские горы препятствуют западному переносу воздушных масс, и барические образования вынуждены или оставаться на территории республики, постепенно заполняясь (тип 2), или искать выход, обходя южную или северную оконечность Уральских гор.

Из 30 рассмотренных случаев за исследуемый период в 21 случае, а это 70 %, перемещение циклонов происходило через «Северные ворота». При таком типе трекинга происходит дальнейшее углубление циклона, давление в центре циклона падает, до республики циклон доходит в среднем за сутки. Стоит отметить, что одним из типов трекинга до 90-х годов (по записям синоптиков Гидрометцентра Башкирского УГМС) являлась траектория «Южных ворот», когда циклоны, двигаясь в широтном направлении, заходя на территорию республики с юго-запада, покидали ее в северо-восточном или восточном направлении, огибая Уральские горы с юга. Однако в исследуемый период не было ни одного случая таких перемещений, что указывает на усиление межширотного обмена и более меридиональный характер процессов.

Более редким типом трекинга (5 из 30, или 17 %) является стационарирование циклонов и заполнение на территории республики. Изменение давления по 2 типу происходит скачкообразным образом (рост, падение, рост), до территории республики циклон смещается в среднем за 4 суток.

Третий установленный за период исследований тип трекинга – циклоны, смещающиеся вдоль Уральских гор. Таких случаев оказалось 4 из 30 (13 %). Уральские горы оказывают влияние на перемещение циклонов, расположенных в меридиональном направлении на восточной окраине республики. По 3 типу давление в центре циклона постепенно понижается, а в последние сутки практически остается постоянным.

Результаты данного исследования в качестве дополнительного источника информации могут быть

использованы синоптиками-прогнозистами в оперативной работе.

### Литература

1. Волобуева О.В., Горохольская В.З. Специализированное гидрометеорологическое обеспечение некоторых отраслей экономики Республики Башкортостан и пути повышения его качества. Метеоспектр, 2006, № 3, С. 82–87.
2. Волобуева О.В., Горохольская В.З., Топтунова О.Н. Синоптические процессы и явления погоды, влияющие на деятельность транспорта в Республике Башкортостан (Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета 22–24 октября 2020 года «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ») Спб.: ФГБОУ ВО «РГГМУ». 2020. С. 131–132.
3. Волобуева О.В., Топтунова О.Н., Дробжева Я.В. Анализ выхода южных циклонов на территорию Республики Башкортостан. - Гидрометеорологические исследования и прогнозы. - Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, 2021, выпуск № 2 (380), С. 66–76.
4. Горохольская В. З., Волобуева О. В. Сильные ветры и метели на территории Республики Башкортостан. - Метеорология и гидрология, 2006, № 7, С. 49–55.
5. Лапина С.Н., Алимбиева М.А. «Специализированное метеорологическое обеспечение отраслей экономики». Учебно-методическое пособие по курсу «Экономическая метеорология» для студентов, обучающихся по направлению 05.03.05 Прикладная гидрометеорология. Саратов: ИЦ «Наука», 2020. 50 С.

## ТЕНДЕНЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В.П. Горбатенко

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

*vpgor@ggf.tsu.ru*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 p\_a.

На фоне глобального изменения климата изменился диапазон значений ряда климатических характеристик, учитываемых при развитии разных отраслей экономики. Представлены результаты анализа изменчивости основных характеристик климата Западной Сибири используемых при планировании развития транспортной системы региона. В работе сделан акцент на анализ изменений основных климатических показателей территорий, ограниченных диапазоном 55–60° с.ш. и 65°–85° в.д.

*Ключевые слова: развитие транспортной системы, изменение климата.*

Against the background of global climate change, the range of values of a number of climatic characteristics that are taken into account in the development of various sectors of the economy has changed. The results of the analysis of the variability of the main characteristics of the climate of Western Siberia used in planning the development of the transport system of the region are presented. The work focuses on the analysis of changes in the main climatic indicators of territories limited to the range of 55–60° N and 65°–85° E.

*Key words: development of the transport system, climate change.*

Согласно долгосрочной программе развития экономики Российской Федерации и стратегии на ближайшие десятилетия предусматривается модернизация транспортной отрасли, и в первую очередь, ее инфраструктуры. Приоритетными являются задачи, связанные с перспективой развития грузоперевозок а для отдельных субъектов актуальным остается строительство дорог. Территория юго-востока Западной Сибири отличается сравнительно низкой транспортной освоенностью. В особенности это касается Томской области, имеющей большую концентрацию природных ресурсов, которая занимает 70 и 72 места соответственно по густоте автомобильных и железных дорог среди регионов России, в то время как по объему перевозимых грузов находится на 32 месте. Несмотря на благоприятные тенденции в работе транспорта, современное состояние системы не отвечает потребностям и перспективам развития экономики: старение и износ основных фондов по отдельным видам деятельности негативно сказывается на качестве обслуживания населения и хозяйствующих субъектов, оказывает отрицательное влияние на окружающую среду. Все большую роль в этом процессе играют изменившиеся характеристики климата.

Западная Сибирь относится к регионам наибольшей скорости потепления климата и, как следствие, больших изменений климатических характеристик, используемых при планировании экономической деятельности. Для реализации обширных планов по строительству новых дорог в Западной Сибири вообще и Стратегии развития транспортной системы Томской области в 2008–2025 гг. ([http://storage.esp.tomsk.](http://storage.esp.tomsk.gov.ru/files/2354/Strategiya_razvitiya_transportnoj_sistemy.pdf)

[gov.ru/files/2354/Strategiya\\_razvitiya\\_transportnoj\\_sistemy.pdf](http://storage.esp.tomsk.gov.ru/files/2354/Strategiya_razvitiya_transportnoj_sistemy.pdf)) необходимо обеспечение дорожных организаций информационными ресурсами о текущем и будущем климате области для решения задач проектирования, строительства, ремонта и содержания автомобильных дорог, а также обеспечения безопасности дорожного движения.

Целью настоящей работы является анализ изменений основных климатических параметров Западной Сибири, которые учитываются при планировании развития транспортной системы.

**Материалы и методы.** Материалом для исследования повторяемости климатических параметров, послужили данные метеорологических ежемесячников на 39 станциях юго-востока Западной Сибири за период 1966–2019 гг. и базы данных ВНИИГМИ МЦД (<http://meteo.ru>). Методы исследования: синоптический анализ, статистический анализ метеорологических рядов и географический анализ пространственной локализации анализируемых объектов. Обработка данных осуществлялась с помощью пакетов прикладных программ (Statistica, Excel) стандартными методами математической статистики. Статистическая значимость выявленных тенденций оценивалась с применением критерия Стьюдента (при 5%-ном уровне значимости).

Поскольку территория Западной Сибири характеризуется разнообразием величин и направлений тенденций изменчивости климатических характеристик, общие для всей территории выделить невозможно. Большинство климатических характеристик в разных частях территории Западной Сибири демонстрируют

разные пределы изменчивости и разнонаправленные тенденции их повторяемости. В работе сделан акцент на изменение основных климатических показателей территорий, ограниченных диапазоном географических координат 55–60° с.ш. и 65–85° в.д.

Наряду с транспортными нагрузками на прочность дорожного покрытия особое влияние оказывают природно-климатические факторы: температура окружающего воздуха, влажность, облачность, солнечная радиация, атмосферные осадки и их распределение по сезонам года, в том числе высота снежного покрова, глубина промерзания, направление и скорость ветра. Особенно следует выделить температуру окружающего воздуха и воздействие солнечной радиации, которые напрямую формируют температурное поле в слоях конструкции дорожного покрытия, что сказывается на прочности конструкции. Количество и распределение атмосферных осадков по сезонам года тоже имеет важное значение, поскольку от них зависит водно-тепловой режим земляного полотна и дорожного покрытия.

**Экстремумы температуры.** Ведущую роль в формировании социально-экономических рисков, играет повторяемость положительных и отрицательных экстремальных значений температуры воздуха над Западной Сибирью. Продолжительные волны холода для зимних периодов в эпоху до глобального потепления были для исследуемой территории нормой, и к ним система хозяйственного комплекса была адаптирована. Но в последние десятилетия потепление в Западной Сибири наблюдается и в летние месяцы. Результаты исследования (Огурцов Л.А. и др., 2016) повторяемости периодов с высокими температурами воздуха (волн жары) в теплый период года, свидетельствуют о наличии тенденции повторяемости погоды, приводящей к ухудшению самочувствия людей (Кужевская И.В. и др., 2015), роста потребления электроэнергии, увеличения числа лесных пожаров (Горбатенко В.П. и др., 2015) и к ухудшению экологической обстановки в целом (Волкова М.А. и др., 2013). Получено, что в нескольких регионах Западной Сибири, в ближайшем будущем в летний период следует ожидать высокую повторяемость волн жары. Следовательно, актуально проведение и соответствующих мероприятий, которые будут способствовать минимизации экономического и социального ущерба в разных отраслях экономики конкретных регионов. Поскольку экстремальность климата увеличивается, следовательно необходимо усиливать меры по увеличению стойкости дорожных покрытий по всей территории области. Следует ориентироваться на более быстрое разрушение дорожных покрытий, чем было предусмотрено в предыдущий климатический период.

**Температура воздуха ниже 0 °С.** В периоды с отрицательной среднесуточной температурой особую опасность представляют нагрузки на хозяйственные объекты, обусловленные такими метеорологическими явлениями как снег, гололед, ветер, снежные заносы, гололедно-изморозевые явления, глубокое

промерзание грунтов, резкие перепады температур, характеристики снежного и ледового покрова. Наиболее часто встречающееся явление – изморозь – составляет 84% всех случаев всех явлений зимнего периода. Наиболее часто встречающаяся непрерывная продолжительность отложений изморози находится в диапазоне 7–12 часов, гололеда и отложений мокрого снега – в пределах 6 часов. В результате изучения метеорологических условия формирования зимней скользкости, получено, что количества используемых сегодня в практике дорожного обслуживания циклов обработки дорог противогололедными материалами недостаточно для обеспечения требуемого уровня содержания и безопасности движения на сети дорог северных регионов. Число циклов обработки противогололедными материалами необходимо увеличить почти в 1,5 раза (Кужевская И.В. и др., 2019). На фоне сокращения числа дней с низкими температурами воздуха в зимний период, увеличивается число погодных явлений погоды, характерных для оттепелей. Например, изменилась характеристика «толщина стенки гололеда» превышаемая определенную величину. В сложившемся климате диаметр гололедных отложений существенно увеличился и может достигать 30–40 мм. Ранее «толщина стенки гололеда» изменялась в пределах 3–5мм. Это необходимо учитывать при проектировании, строительстве и эксплуатации дорожных покрытий.

**Частота перехода температуры 0 °С.** Среднее годовое число переходов температуры через 0 °С на территории Томской области составляет 65–66. При этом статистически значимых тенденций их увеличения на территории области не обнаружено. Тем не менее в северной части исследуемой территории наблюдаются смещение климатических сроков устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °С как весной, так и осенью (Барашкова Н.К. и др., 2015). В некоторых районах увеличивается и число таких переходов, которые стали наблюдаться и в зимние месяцы. Например в феврале 2021 г. на протяжении нескольких суток температура воздуха была выше 0 °С. На территориях, где замечено увеличение числа таких переходов, следует ожидать ухудшения условий эксплуатации зданий и сооружений. В частности, сокращается период их доремонтной эксплуатации, уменьшается долговечность. При этом в конце холодного периода (весной) таких переходов становится больше, чем в начале (осенью). В ноябре случается 7–9 переходов, в апреле 12–16. На уровне 60 с.ш., даже в мае наблюдается от 8 до 12 таких переходов.

**Переход средней суточной температуры через 5°С.** Для определения периода производства основных дорожных работ (железобетонных, асфальтовых покрытий) весной и осенью принят устойчивый переход средней суточной температуры через 5°С. На исследуемой территории обнаружено смещение дат перехода через 5 °С на более ранние сроки на 6–9 дней. При этом наибольшая величина сдвига дат отмечается на севере территории, наименьшая – в ее южной

части (Барашкова Н.К. и др. 2015). На севере области планирование дорожных работ в весенний период рекомендуется сдвинуть раньше на две недели, в южной части на неделю. Причем продолжительность выполнения таких мероприятий может быть увеличена практически на месяц. В осенний период такие мероприятия следует планировать позднее и также с большей продолжительностью.

**Структура и динамика изменчивости суммы атмосферных осадков.** Исследованы важнейшие для транспортной отрасли характеристики осадков: непрерывная продолжительность периодов с осадками и без осадков, тенденции их изменения (Волкова М.А. и др., 2015). Получено, что годовое количество атмосферных осадков в течение последних 50 лет имеет тенденцию повсеместного роста на величину от 2 мм/10 лет до 20 мм/10 лет в разных районах Западной Сибири. Учитывая, что увеличилась, в основном, доля ливневых осадков, увеличивается вероятность затопления территорий, образование новых оврагов, оползней, провалов грунта. Если такая тенденция сохранится в ближайшее десятилетие, то возможно и размывание фундаментов зданий, размыв берегов рек. В городах это также повлечет за собой затруднение работы транспорта. Особенно актуально готовиться к учащению таких событий в южных районах Западной Сибири и на территории Алтайского края.

Автомобильный транспорт также уязвим к воздействию ветровых нагрузок с возможными последствиями аварий вследствие сдвига автомобиля, изменения траектории или опрокидывания. Число дней с ветром 15 м/с и более существенно сокращается (на 70–80 %), варьируя в диапазоне 5–15 дней, что является благоприятным фактором в новых климатических условиях (Журавлев и др., 2019). Другим преимуществом сложившегося климата является уменьшение повторяемости метелей. За последние три десятилетия произошло уменьшение в 2–3 раза как числа дней с метелью, так и средней продолжительности метелей (Горбатенко и др., 2018).

Пространственные особенности изменений в профилях температуры почвы, влияющих на физико-механические характеристики грунтов земляного полотна. Кроме транспортных нагрузок на прочность дорожного покрытия особое влияние оказывает глубина промерзания почвы. Анализировалась температура почвы на глубине 5 см на метеорологических станциях Томской области за период 2000–2019 гг. отдельно для мая, июня и июля каждого года. Получено, что при наличии синхронности в межгодовых вариациях температуры почвы над всей территорией Томской области, зональность ее распределения сохраняется. Температура почвы в северных частях территории ниже чем на остальных станциях. В мае разница температур почвы на глубине 5 см составляет по территории области в среднем 3–4 °С, в июне 2–3 °С, в июле 1,0–1,5 °С. Однако на всей территории области до 1962 г. температура почвы на глубине 5 см в июне была на 2–3 °С ниже чем в настоящее время; в

июле на 1 °С ниже чем в анализируемый период. Наибольшая скорость потепления почвы на глубине 5 см приходится на весенние месяцы и начало лета. Наибольшее увеличение температуры почвы на глубине 5 см приходится на более северные станции Томской области.

**Продолжительность залегания снежного покрова,** формирующего снежные заносы, в Томской области в среднем составляет 180 дней. Наблюдается уменьшение продолжительности залегания за последние 30 лет, что обусловлено изменением сроков залегания и разрушения снежного покрова (Gorbatenko et al., 2019). Однако в разных частях исследуемой территории тенденции изменения толщины снежного покрова и продолжительности его залегания различны. Поэтому при проектировании работ, для которых эти характеристики являются значимыми необходимы дополнительные исследования.

Грозовая активность на территории Западной Сибири невелика. В районах среднего течения рек Обь и Иртыш, южнее 58° с.ш., ежегодно наблюдается 20–30 дней с грозой. Ранее, столь умеренная грозовая активность не требовала больших расходов на молниезащитные мероприятия. На фоне глобального потепления климата, атмосфера Западной Сибири стала не только более теплой, но и более насыщенной влагой. Это сопровождается интенсификацией конвективных процессов и увеличением частоты опасных погодных явлений, обусловленных ее развитием. Чрезвычайные ситуации, обусловленные развитием глубокой мезомасштабной конвекции (град, шквал, смерч), в последние десятилетия повторяются гораздо чаще, чем до 2000 г. (Горбатенко и др., 2020). Несмотря на то, что статистически значимых тенденций в изменении уровня грозовой активности над Томской областью за исследуемый период не выявлено, замечено увеличение числа гроз в весенний и осенний периоды. Увеличилась повторяемость выпадений града и его величина, что представляет опасность для многих отраслей экономики. Безусловное увеличение грозовой активности замечено в области 60–62° с.ш. Увеличивается продолжительность грозового сезона и число дней с грозой в году.

Лесные пожары вызывают ограничения дальности видимости на дорогах. На территории Томской области наибольшие проблемы с видимостью на автомобильных дорогах возникают в южной, наиболее заселенной части области (Кижнер и др., 2021). Поскольку плотность автомобильных дорог в этом районе наибольшая, то их безопасную эксплуатацию в теплый период года могут обеспечить меры по быстрой ликвидации пожаров и предотвращение их разрастание по площади.

#### **Выводы:**

Несмотря на то, что потепление климата в Сибири для жителей региона является фактором, на первый взгляд положительным, изменение ряда климатических характеристик может иметь значительные последствия для ряда отраслей экономики, включая

развитие и эксплуатацию сети автомобильных дорог региона.

Для внедрения результатов научных исследований в экономические расчеты необходима масштабная пропаганда необходимости быстрого реагирования на новые климатические условия, необходима новая модель коммуникации климатологов и экономистов. Значения климатических параметров, применяемые в нормативных документах разных отраслей экономики должны обновляться с периодичностью не более чем 5 лет. На сегодняшний день применяющиеся нормативы утверждены 30 и более лет назад. В сегодняшнем климате они не обеспечивают запланированный уровень безопасности функционирующих объектов экономики.

### Литература

1. Барашкова Н.К., Кужевская И.В., Носырева О.В. Климатические характеристики режимов устойчивого перехода температуры воздуха через определенные пределы на юге Западной Сибири // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2015. № 1. С. 87–97.
2. Волкова М.А., Ивашкова О.А., Чередыко Н.Н. Особенности формирования и социально-экономические последствия температурных рисков в Томской области // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 374. С. 180–187.
3. Волкова М.А., Чередыко Н.Н., Соколов К.И., Огурцов Л.А. Современная пространственно-временная структура поля экстремальных осадков на территории Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 390. С. 202–210.
4. Горбатенко В.П., Громницкая А.А., Константинова Д.А., Ершова Т.В., Нечепуренко О.В. Оценка роли климатических факторов в возникновении и распространении лесных пожаров на территории Томской области // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 395. С. 233–243.
5. Горбатенко В.П., Журавлев Г.Г., Носырева О.В., Волкова М.А., Кижнер Л.И., Константинова Д.А. Современные изменения климатических условий, определяющих накопление снега на автомобильных дорогах Томской области // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 4. С. 39–54.
6. Журавлев Г.Г., Горбатенко В.П., Тунаев Е.Л. Метели на территории Томской области // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 594. С. 137–151.
7. Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. №5. С. 108–116.
8. Кужевская И.В., Поляков Д.В., Волкова М.А., Барашкова Н.К. Температурные волны тепла как отражение изменчивости современных климатических условий жизнедеятельности на территории Томской области // Экология человека. 2015. № 2. С. 3–9.
9. Кужевская И.В., Волкова М.А., Нечепуренко О.Е., Киряков Е.И., Чурсин В. В. Климатические характеристики формирования зимней скользкости на сети автомобильных дорог на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югра // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2019. № 595. С. 190–203.
10. Кижнер Л.И., Барашкова Н.К., Носырева О.В. Пожарная опасность в лесах Томского региона: климатический фактор и экономические риски // Геосферные исследования. 2021. № 2. С. 110–119.
11. Огурцов Л.А., Чередыко Н.Н., Волкова М.А., Журавлев Г.Г. Динамика показателей экстремальности климата на территории Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 8. С. 633–639.
12. Gorbatenko V.P., Sevast'yanov V.V., Konstantinova D.A., Nosy'reva O.V. Characteristic of the snow cover for the Western Siberia territory // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 232. pp. 1–5.

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ МЕЖДУРЕЧЬЯ ОБЬ-ИРТЫШ В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД ГОДА

В.П. Горбатенко<sup>1</sup>, К.Н. Пустовалов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия, [vpgor@tpu.ru](mailto:vpgor@tpu.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
[const.pv@yandex.ru](mailto:const.pv@yandex.ru)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 p\_a.

Предоставлены результаты анализа метеорологических полей над болотными системами Западной Сибири в теплый период года за период 1990–2019 г. Выделены факторы, обеспечивающие увеличение конвективного потенциала атмосферы, объясняющие причины увеличения грозовой активности и частоты выпадений града.

*Ключевые слова:* опасные явления погоды, конвекция в атмосфере

The results of the analysis of meteorological fields over the bog systems of Western Siberia in the warm period of the year for the period 1990–2019 are provided. The factors providing an increase in the convective potential of the atmosphere, explaining the reasons for the increase in thunderstorm activity and the frequency of hail fallout, are identified.

*Keywords:* dangerous weather phenomena, convection in the atmosphere

На фоне регистрируемого потепления атмосферы Западной Сибири, особенно заметны изменения в теплый период года. На фоне увеличения продолжительности теплого периода, маркером которого являются устойчивые переходы значений средних суточных температур воздуха через определенные пределы (0, 5 °С), заметно увеличивается число и интенсивность опасных конвективных явлений – гроз, града, шквалов и смерчей. Такие явления свидетельствуют об усилении неустойчивости атмосферы, оцениваемой по температурно-влажностным характеристикам всей толщи тропосферы. Особенно заметное увеличение неустойчивости атмосферы наблюдается в районе ограниченном диапазоном 75–85° в.д. и 60–62° с.ш. За последние два десятилетия граница активной конвекции постепенно отодвигается на север и к 2019 г. достигла параллели 62° с.ш. (Горбатенко и др., 2020). Сравнение характеристик выпадающего града по сравнению с периодом 1936–1965 гг. показала тенденцию двукратного увеличения числа дней с продолжительно выпадающим градом (30–60 минут), а также с градом большого диаметра (более 10 мм). Об интенсификации конвективных процессов свидетельствует и то, что верхняя граница кучево-дождевых облаков в день с грозой и градом, поднимается до поверхности 270–280 гПа, иногда достигая высоты уровня 200 гПа (9–11 км), что является свидетельством увеличения высоты тропопаузы (Боровко, Крупчатников, 2015).

Самым ярким свидетельством увеличения неустойчивости атмосферы в последнее десятилетие, является тот факт, что на широте 60° с.ш. (в районе г. Ханты Мансийка) практически ежегодно регистрируются смерчи, которые были совсем не характерны для этого региона ранее. Не исключено, что они образуются

чаще, чем регистрируются, поскольку плотность заселенности территории в этом регионе невелика.

Взаимодействие факторов глобального потепления климата с региональными природными системами – малоизученная область наук о Земле. Современное увеличение содержания парниковых газов в атмосфере Земли вызывает потепление, которое оказывает влияние на природные системы. В ответ происходят изменения свойств этих систем и, возникает обратное воздействие на состояние атмосферы и всей климатической системы Земли. Наличие таких процессов вероятно и на исследуемой территории.

Целью настоящей работы является анализ пространственных особенностей метеорологических полей, формирующих опасные явления погоды на территории, ограниченной диапазоном 50–64° с.ш., 60–95° в.д. за последний 30 лет.

Наряду с анализом метеорологических полей на территории всего междуречья особое внимание будет уделено изменчивости процессов, происходящих над территорией БВБ.

Рабочая гипотеза: на фоне глобального изменения климата происходят существенные региональные изменения климатических характеристик атмосферы на территории междуречья Обь-Иртыш. Увеличивается конвективный потенциал атмосферы, способствующий усилению всего спектра мезомасштабной конвекции: от увеличения мелкомасштабной турбулентности атмосферы, проявляющейся в увеличении числа и площади термиков (струй восходящих движений воздуха), увеличения конвективной облачности до увеличения частоты образования циклонов.

В работе анализировались поля пространственного распределения приземных значений температуры воздуха,

давления и скорости вертикальных движений (на высоте 950 гПа). Сравнивались пространственные особенности анализируемых полей за разные десятилетия анализируемого периода: 1990–1999, 2000–2009, 2010–2019 гг. Значения температуры воздуха, давления у поверхности земли, скорости восходящих движений за летние месяцы определялись по данным реанализа ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) в узлах сетки  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ .

Влияние подстилающей поверхности на атмосферу пограничного слоя (до 1500 м) огромно и формирует особенности строения пограничного слоя атмосферы. Турбулентность и вертикальные движения являются механизмом, определяющим интенсивность теплообмена в атмосфере и температурно-влажностную структуру пограничного слоя. Под влиянием этих факторов движение воздушных потоков приобретают характер пульсаций с меняющимся во времени и пространстве направлением и скоростью. Но наряду с пульсационными, неупорядоченными движениями воздуха в пограничном слое атмосферы формируются и упорядоченные движения термического происхождения, связанная с неустойчивой стратификацией атмосферы. Основным фактором, вызывающим ее, являются конвективные движения либо в форме теплых струй воздуха, либо в форме отдельных замкнутых объемов теплого воздуха — «пузырей». В некоторых случаях происходит объединение нескольких конвективных элементов и образуются конвективные струи (так называемые термики) с поперечниками, достигающими до 2–3 км. Поскольку подстилающая поверхность междуречья Обь-Иртыш представляет собой систему из 800 тысяч небольших озёр и рек, их наличие и изменчивость физического состояния увеличивают контрасты

температуры способствует формированию термиков. Их образованию способствуют и зоны выпуклых грязево-мочажинных болот и зоны разнотипных болот — эвтрофных и выпуклых сосново-сфагновых с участием переходных болот (Васюганское болото..., 2003). Площадь болот является дополнительным источником влаги, которая поднимается вместе с восходящими движениями, что приводит к усилению неустойчивости атмосферы и развитию более интенсивных мезомасштабных конвективных явлений (Тунаев, Горбатенко, 2018). Такая структура подстилающей поверхности обеспечивает формирование температурных неоднородностей приземного слоя атмосферы (рис. 1).

Анализируя пространственные распределения полей температуры воздуха, можно заметить, что в последнее десятилетие оно существенно изменилось. В междуречье Обь-Иртыш и над болотным комплексом юго-западнее Ханты-Мансийска, появились очаги тепла, на градус и более превышающие средние фоновые температуры. Что касается Большого Васюганского Болота (БВБ), то над его территорией в последнее десятилетие также появились температурные неоднородности, расположенные как внутри его территории, так и по контурам. Границы БВБ практически оконтуриваются изолиниями равных значений температуры воздуха на высоте 2 м над подстилающей поверхностью.

Изменились не только поля температуры воздуха. Анализ полей атмосферного давления позволяет обнаружить формирование очагов пониженного давления над междуречьем Обь-Иртыш на протяжении всего теплого периода года (рис. 2). Причем пониженное давление формируется не только у поверхности земли, но распространяется и на высоты.

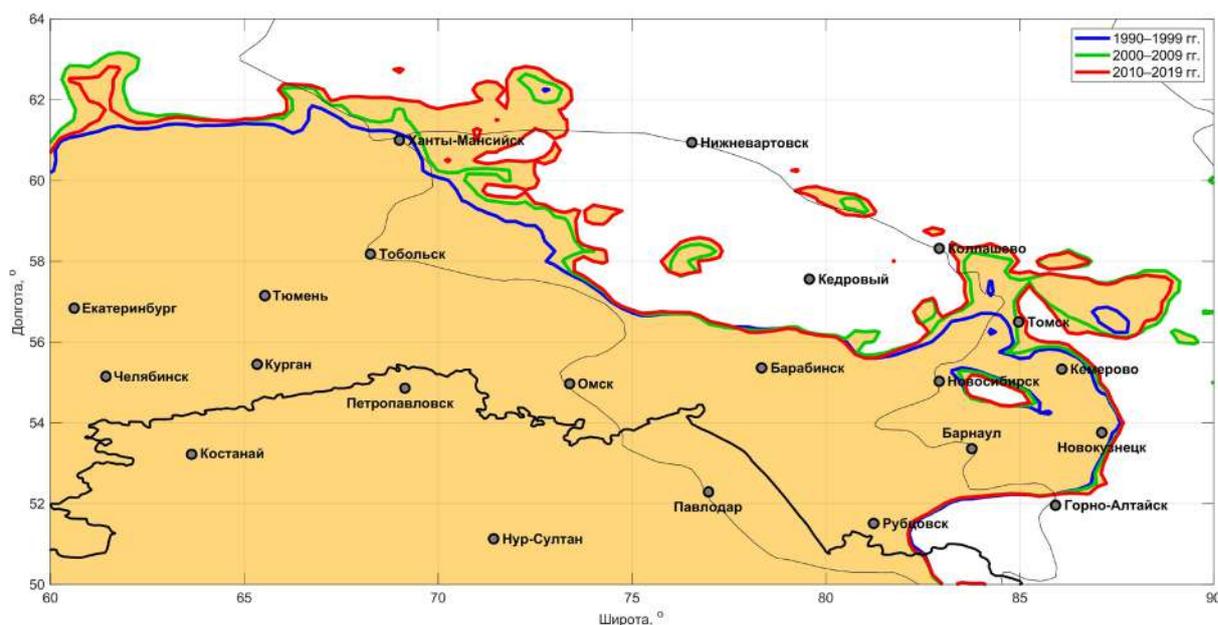


Рис. 1. Пространственное положение линий равных значений температуры воздуха ( $14^\circ\text{C}$ ) над междуречьем Обь-Иртыш в срок 18:00 ВСВ в разные десятилетия.

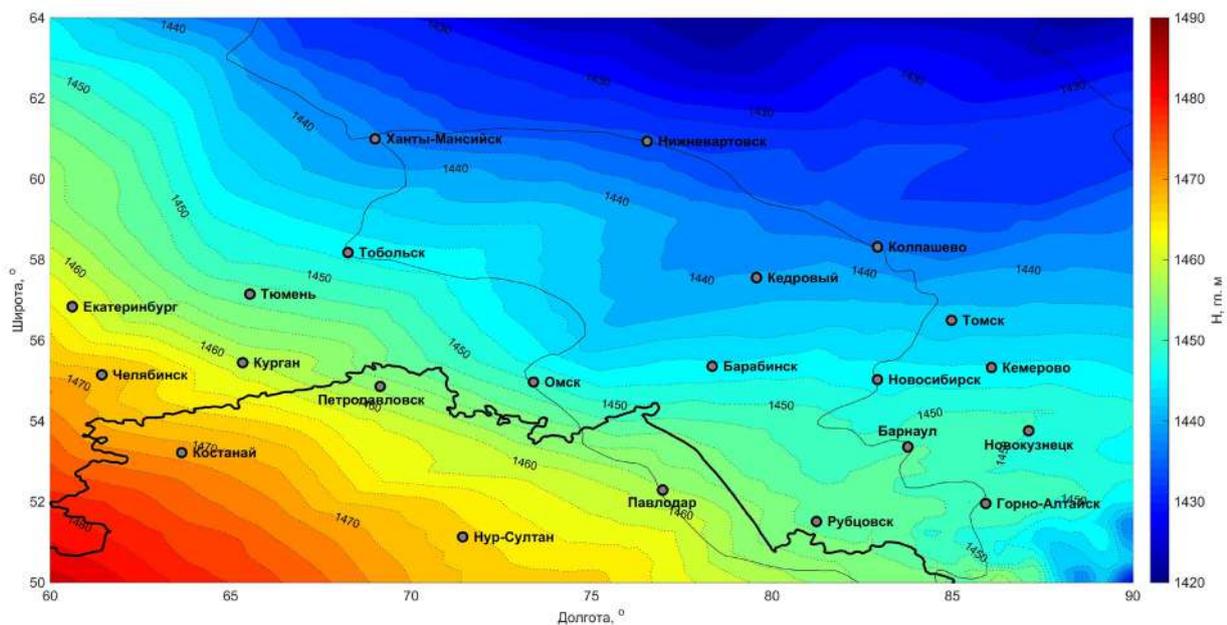


Рис. 2. Пространственное распределение значений высоты поверхности 850 гПа над междуречьем Обь-Иртыш в период 2000–2019 гг.

Поля пониженного атмосферного давления формировались в два последних десятилетия. За период 1990–1999 гг. столь выраженной ложбины над исследуемой территорией не наблюдалось.

Известно, что формирование микро и мезоциркуляционных процессов активнее происходит на фоне циклонической кривизны изобар у поверхности земли. Хотя, в целом, в летние месяцы над исследуемым районом господствуют малоградиентные поля давления атмосферы при средних значениях 1007–1010 гПа, над районом междуречья Обь-Иртыш градиенты давления наименьшие, а изогипсы огибают этот район со всех сторон, обозначая область пониженного давления, приходящуюся на район междуречья. Наличие квазициклонической кривизны изобар у поверхности Земли в летние месяцы в летние месяцы обеспечивает конвергенцию горизонтальных приземных потоков, необходимую для обеспечения подъема массы достаточно влажного и теплого воздуха восходящими потоками. Этот процесс обеспечивает достаточно быстрое образование облачности с выделением скрытого тепла конденсации и приводит к развитию как мелкой, так и глубокой конвекции.

Дополнительным фактором прогрева атмосферы могут являться являются эмиссии метана из болотных комплексов, что приводит к неравномерному росту значений температуры почв и воздуха над этими комплексами, увеличивая бароклинность атмосферы над этим районом. Динамика изменчивости полей температуры воздуха, давления и скорости восходящих потоков над окрестностями Ханты-Мансийка и БВБ свидетельствуют о повышении бароклинности и увеличении возможностей для формирования опасных конвективных явлений. Оценки междекадной изменчивости скорости восходящих движений показали,

что в последнее десятилетие отмечается значительное увеличение площади зон с восходящими потоками, а также скорости восходящих движений в них как в дневное, так и в ночное время. Наиболее сильные междекадные изменения отмечаются над центральной частью междуречья Обь-Иртыш и в окрестностях БВБ. Особенно отчетливо в пространственной картине вертикальных движений проявляются границы БВБ в ночное время. Границы БВБ остаются теплее площади основного массива и внутри массивы формируются очаги повышенных значений вертикальной скорости восходящих движений.

Заметим, что в атмосфере Западной Сибири замечено увеличение содержания метана. Согласно исследованиям Earth System Research Laboratory (<https://www.climate.gov/>) к 2015 году она составляла до 1800 ppb. До промышленной революции концентрации оставались стабильными на уровне около 700 ppb (<https://earthobservatory.nasa.gov/features/MethaneMatters>).

Наибольшая скорость увеличения содержания метана в атмосфере земли замечена с начиная с 2007 года. Учитывая его высокую теплоемкость, можно ожидать и увеличения значений температуры почв и воздуха в первую очередь, над болотными комплексами. По всей видимости, эти увеличения происходят не равномерно над всей территорией по причине разнообразия структуры болотного комплекса, а фрагментарно, при этом увеличивая бароклинность атмосферы над этим районом.

Мониторинг повторяемости гроз, града, смерчей и циклогенеза является доказательством того, что над территорией междуречья в последние десятилетия формировались условия, способствующие увеличению вихреобразовательной активности атмосферы разных масштабов.

И даже если этот процесс не играет решающей роли в имеющихся тенденциях потепления климата Сибири, его вклад в изменение климата на региональном уровне очевиден.

### Литература

1. Боровко И.В., Крупчатников В.Н. Математическое моделирование реакции циркуляции Гадля и стратификации внетропической тропосферы на изменения климата с помощью спектральной модели общей циркуляции атмосферы // СибЖВМ. 2015. Т. 18, № 1. С. 27–40.
2. Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование) / 2-изд., под редакцией чл.-корр. Л.И. Инишевой. Томск: ЦНТИ, 2003, – 181 с.
3. Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. № 5. С. 108–117.
4. Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П. Энергетические характеристики атмосферы при циклогенезе над районами Васюганского Болота // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 4 (370). С. 48–62.

УДК 504.455+504.064.36:574

## УДЕЛЬНЫЙ ПОТОК МЕТАНА С ПОВЕРХНОСТИ РАЗНОТИПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ

М.Г. Гречушникова<sup>1,2</sup>, Д.В. Ломова<sup>2</sup>, В.А. Ломов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Москва, Россия, [allavis@mail.ru](mailto:allavis@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт водных проблем РАН, Москва, Россия, [florainter@mail.ru](mailto:florainter@mail.ru)

Работа выполнена в рамках темы «Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши» (121051400038-1).

В работе представлены материалы квазисинхронных измерений удельного потока метана на разнотипных водохранилищах, находящихся в сходных природно-климатических условиях. Выявлены принципиальные различия эмиссии метана, которые определяются гидрологическим режимом, зависящим от проточности водохранилищ.

*Ключевые слова:* метан, водохранилище, водообмен, стратификация, донные отложения.

The paper presents the materials of quasi-synchronous measurements of the methane specific flux on different types of reservoirs located in similar natural and climatic conditions. Fundamental differences in the methane emission are revealed, which are determined by the hydrological regime, depending on the flow rate of reservoirs.

*Keywords:* methane, reservoir, water exchange, stratification, sediments.

**Актуальность работы** обусловлена немногочисленностью натуральных измерений эмиссии метана с поверхности искусственных водоемов и задачами параметризации этого процесса в глобальном масштабе. Сопоставление выполненных оценок эмиссии на основании обобщения натуральных данных из (Deemer et al, 2016) с данными по новым объектам показало, что классификация и осреднение удельного потока метана с водоемов по природным зонам не являются перспективными. Более детальный анализ базы данных из (Deemer et al, 2016) и классификация удельного потока (УП) с учетом не только природной зоны, но и проточности, трофического статуса и средней глубины водоема (Гречушникова, Школьный, 2019) дает результаты более близкие к натурным измерениям. Многолетние наблюдения на Можайском водохранилище показали, что УП метана изменяется не только по длине водоема, но и значительно зависит от гидрологической структуры слабопроточного водоема в каждом году, что определяется метеорологическими условиями года (Lomov et al, 2020) (рис. 1).

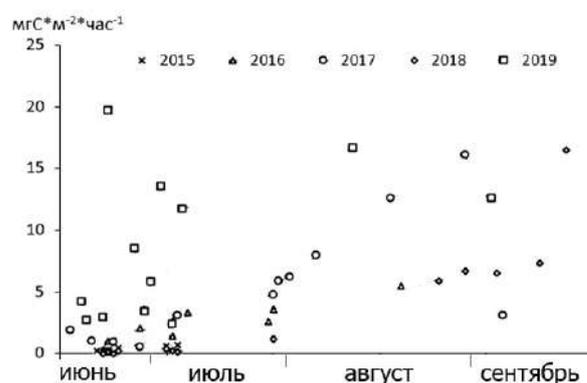


Рис. 1. Изменение удельного потока метана в атмосфере в течение летнего периода на станции Красновидово Можайского водохранилища в 2015–2019 гг.

**Цель работы** – сравнить удельный поток метана с поверхности двух водохранилищ, находящихся в одной природной зоне, сходных синоптических условиях, но различающихся проточностью.

### Объекты исследования, методы и материалы.

Иваньковское водохранилище имеет среднегодовой коэффициент водообмена ( $K_v$ )  $7,9 \text{ год}^{-1}$ . Помимо водоснабжения столицы его воды используются для охлаждения систем Конаковской ГРЭС. Это сказывается на тепловом режиме водоема ниже по течению, но на содержании и эмиссии метана, как показали наблюдения, не отражается. Можайское водохранилище относительно глубоководно и слабопроточно ( $K_v = 1,78$ ). Большую часть периода открытой воды водохранилище стратифицировано: до глубины 6–8 м содержание кислорода превышает 70 %, а ниже слоя плотностного скачка образуется бескислородная зона. В Иваньковском водохранилище стратификация выражена существенно меньше. Оба водохранилища относятся к долинному типу и имеют асимметричный продольный профиль. В августе 2020 г. были проведены гидрологические съемки на указанных водоемах с интервалом в 1 неделю. Измерено вертикальное распределение температуры, растворенного кислорода, электропроводности (кондуктометр МАРК-601 и оксиметр YSI ProODO). Содержание метана в отобранных батометром Руттнера пробах определялось на газовом хроматографе Хроматэк-Кристалл 5000.2. Расчет концентрации метана в водных пробах производился методом headspace. На станциях проводилось измерение удельного потока метана в атмосферу методом плавучих камер. Расчет диффузионного потока метана в атмосферу произведен методом TBL. Работы включали эксперименты для определения потоков веществ на границе «вода - донные отложения (ДО)» методом трубок. Подробно стандартный комплекс описан в (Гречушников и др., 2020).

Полученные результаты приведены в табл. 1. В Можайском водохранилище (далее МВ) к августу сформировалась стратификация и наблюдался дефицит кислорода в придонном слое на всех исследованных станциях. В Иваньковском водохранилище (ИВ) наименьшее содержание  $O_2$  наблюдалось на станциях Конаково и Корчева, при этом концентрация  $O_2$  не была ниже 1 мг/л. Величина гигроскопической влажности грунта ( $d$ ) и содержание органического вещества (ОВ) в грунтах глубоководных станций ИВ были выше, чем в МВ, однако различия не существенны. Наименьшее содержание ОВ характерно для верхних районов водоемов, что связано с наибольшей их проточностью

здесь и влиянием речных водных масс. Песчаный грунт на станции Городня не удалось полноценно отобрать для постановки эксперимента. Несмотря на схожие свойства ДО, диффузионный поток метана из них, определенный методом трубок, в исследуемых водоемах существенно отличается, что связано с различием содержания  $O_2$  в придонном слое. УП метана в атмосферу для обоих водоемов выше за счет пузырьковой составляющей, которую не может улавливать метод трубок. Для обоих водоемов характерно уменьшение УП метана от верхнего участка водохранилища к плотине, что обусловлено глубиной станции (чем больше глубина, тем больше метана окисляется в толще воды). Но масштабы этой пространственной неоднородности значительно отличаются: для ИВ УП метана изменяется от 3,8 до 84 мг/(м<sup>2</sup> сут), для МВ от 24 до 325 мг/(м<sup>2</sup> сут), что связано с более значительным накоплением метана в ДО и придонных слоях на станции Бесстужево (что обусловлено морфометрическими особенностями МВ). В данном случае фактор глубины влияет не столько на окисление метана, сколько на увеличение температуры придонного слоя (до 17,8 °С) и соответственно более активный метаногенез в ДО, чем у плотины (10,4 °С).

**Выводы и обсуждения.** Результаты квазисинхронных наблюдений на водохранилищах с различным  $K_v$  показали первостепенную важность наличия стратификации в водоеме, как основного фактора, определяющего величину УП метана. Также важно учитывать глубину района, которая вкупе с погодными условиями определяет скорость прогрева придонного слоя и окисление метана в водной толще в слабопроточном МВ. В более проточном ИВ УП метана на порядок меньше, чем в МВ, однако, также имеет место его пространственная неоднородность из-за асимметричного продольного профиля.

Приведенные в табл. 1 данные относятся к УП метана с наиболее глубокой части каждого района водохранилища в области затопленного русла. Исследование поперечной неоднородности для ИВ не производилось, а на МВ дополнительно камеры были поставлены над затопленными поймой и террасой в районе станции Красновидово. Оказалось, что над этими более мелководными зонами УП в среднем на 30 % меньше, что связано с меньшим содержанием ОВ в грунтах (Кременецкая и др., 2018).

Таблица 1. Результаты наблюдений и расчетов характеристик водной толщи, донных отложений и удельного потока метана

Станция	$d$ , %	ОВ, %	УП пов. $CH_4$ , мг/м <sup>2</sup> сут	УП дно дифф. $CH_4$ , мг/м <sup>2</sup> сут	$CH_4$ пов, мкл/л	$CH_4$ дно, мкл/л	$O_2$ дно, мг/л	$H$ , м
Можайское водохранилище 12.08.2020								
Горки	3	2,3	26	0,29	4,3	7,1	0,47	6
Бестужево	5,3	10,7	325	7,9	15	3159	0,52	8
Красновидово	4,5	10,1	96	121	13,1	1809	0,34	14,5

Плотина	6,6	13,3	24	91	7,23	1728	0,25	19
Иваньковское водохранилище 5–6.08.2020								
Городня	0,2	0,3	84	нд	16,6	16,8	7,6	12
Дипкорпус	4,5	10,9	40,8	0,04	8,7	12,6	5,25	10
Конаково	7,4	15,5	12,2	0,75	1,9	7,7	1,96	13
Корчева	6,3	14,5	13	0,08	3	13,3	1,12	14
Плотина	6,9	14,3	3,84	0,03	4,1	7,8	4,84	16

Примечание: d – гигроскопическая влажность ДО, ОВ – содержание органического вещества в ДО, УП CH<sub>4</sub> – суммарный удельный поток метана с поверхности водоема (пов) и диффузионный поток из грунта, O<sub>2</sub> – растворенный кислород, Н – глубина станции

Авторы благодарят коллектив НИС Конаково ИВП РАН и лаборатории математической экологии ИФА РАН за предоставленную возможность отбора и обработки проб.

### Литература

1. Гречушников М.Г., Школьный Д.И., Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России. 2019. № 2. С. 58–71.
2. Гречушников М. Г., Соколов Д. И., Ерина О. Н., Терешина М. А., Ломов В. А., Ефимова Л. Е. Сезонная и синоптическая изменчивость гидроэкологических характеристик слабопроточного долинного водохранилища // Метеорология и гидрология. 2020. №8. С. 92–101.
3. Кременецкая Е.Р., Ломова Д.В., Соколов Д.И., Ломов В.А. Количественная оценка потоков органического вещества в донные отложения стратифицированного водохранилища долинного типа // Вода: химия и экология. 2018. № 7–9 (116). С. 39–46.
4. Deemer B. R., Harrison J. A., Li S., Beaulieu J.J., Delsonro T., Barros N., Bezerra-Neto J., Powers S.M., Dos Santos M.A. and Vonk J.A. Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis, *BioScience*, V. 66, Iss. 11, 1 November 2016. pp. 949–964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
5. Lomov V.A., Stepanenko V.M., Grechushnikova M.G., Repina I.A. Methane fluxes in an artificial valley reservoir according to field observations and mathematical modeling // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 611:012029. 2020.

УДК 551.513.22

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ ПО ДАННЫМ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ СЕТИ WWLLN

А.В. Громова<sup>1,2</sup>, В.П. Горбатенко<sup>2</sup>, П.М. Нагорский<sup>1</sup>, К.Н. Пустовалов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
[gromovaav@inbox.ru](mailto:gromovaav@inbox.ru), [vpgor@tpu.ru](mailto:vpgor@tpu.ru), [npm\\_sta@mail.ru](mailto:npm_sta@mail.ru), [const.pv@yandex.ru](mailto:const.pv@yandex.ru)

Проведена тематическая обработка оперативных данных о локализации молниевых разрядов, зарегистрированных сетью World Wide Lightning Location Network (WWLLN), которые были накоплены за период 2016–2020 гг. Получены оценки пространственного распределения плотности разрядов молний над Томской областью (55–62° с.ш., 75–90° в.д.). Определены основные очаги грозовой деятельности для исследуемой территории. Рассчитана плотность молниевых разрядов и проведен её сравнительный анализ для административных центров Томской области.

*Ключевые слова:* грозовая активность, кучево-дождевые облака, WWLLN.

The thematic processing of operational data on the localization of lightning discharges registered by the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), which were accumulated over the period 2016–2020, was carried out. Estimates of the spatial distribution of the density of lightning discharges over the Tomsk region (55–62° N, 75–90° E) are obtained. The main foci of thunderstorm activity for the studied territory are determined. The density of lightning discharges is calculated and its comparative analysis is carried out for the administrative centers of the Tomsk region.

*Keywords:* thunderstorm activity, cumulonimbus clouds, WWLLN.

Вплоть до конца XX века источниками информации о грозах являлись визуальные наблюдения на метеостанциях и эпизодические инструментальные наблюдения с помощью грозопеленгаторов, что не позволяло получить надёжных оценок о плотности разрядов молний над конкретной территорией. Начиная с 90-х гг. XX века дополнительными источниками информации о грозах стали метеорологические спутники. Так, с 1995 по 2000 гг. регистрация гроз из космоса осуществлялась с помощью аппарата Optical Transient Detector (OTD), установленного на спутнике MicroLab-1, а с 1997 по 2015 гг. – аппаратом Lightning Imaging Sensor (LIS) на спутнике TRMM (Global...; Горбатенко и др., 2009). С начала XXI в. в мире активно развивается Всемирная сеть локализации молний – World Wide Lightning Location Network (WWLLN) (WWLLN...).

Сеть WWLLN даёт информацию о грозовой активности над всем земным шаром посредством регистрации электромагнитных сигналов от гроз в ОНЧ-диапазоне (3–30 кГц). В настоящее время сеть состоит из более 40 пунктов приёма, в том числе на территории России. Согласно (Virts и др., 2013), грозопеленгационная сеть WWLLN обеспечивает беспрецедентную возможность локализации молниевых разрядов в глобальном масштабе с высоким пространственным разрешением и позволяет получить оценки пространственно-временной изменчивости грозовой активности для любого региона планеты.

Ранее в исследованиях (Tarabukina и др., 2017, Karanina и др., 2018, Тарабукина и др., 2021) на основе данных WWLLN было получено распределение плотности разрядов молний над Северной Евразией и Том-

ской областью, однако расчёт выполнялся для относительно грубой сетки и за другие периоды времени.

В этом исследовании ставилась цель оценить распределение плотности разрядов молний на территории Томской области на основе данных WWLLN и провести их анализ.

Для выполнения поставленной цели были использованы оперативные данные WWLLN, накопленные за период 2016 – 2020 гг. Оперативные данные WWLLN выкладываются в открытом доступе с задержкой 6 часов на сайте World Wide Lightning Location Network в формате KMZ (Google Earth) (WWLLN...). Эти файлы содержат информацию о координатах, времени, и других характеристиках каждого зарегистрированного сетью WWLLN разряда молнии за период 1 час.

Для удобства файлы KMZ конвертировали в формат TXT с помощью ГИС-программ. После чего проводилась их пакетная обработка с помощью языка программирования MATLAB.

На основе данных о координатах разрядов молний, зарегистрированных сетью WWLLN, рассчитывалось количество разрядов молний для сетки с ячейками  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  по долготе и широте для территории Томской области ( $55\text{--}62^\circ$  с.ш.,  $75\text{--}90^\circ$  в.д.) за период 2016–2020 гг. Затем определялась площадь каждой ячейки, а на её основе рассчитывалась плотность разрядов молний [разр./(км<sup>2</sup>/год)].

Получены оценки пространственного (рис. 1) распределения характеристик грозовой активности (плотности, повторяемости) над Томской областью за период 2016–2020 гг., а так же рассчитаны значения плотности разрядов молний в её административных центрах (рис. 2).

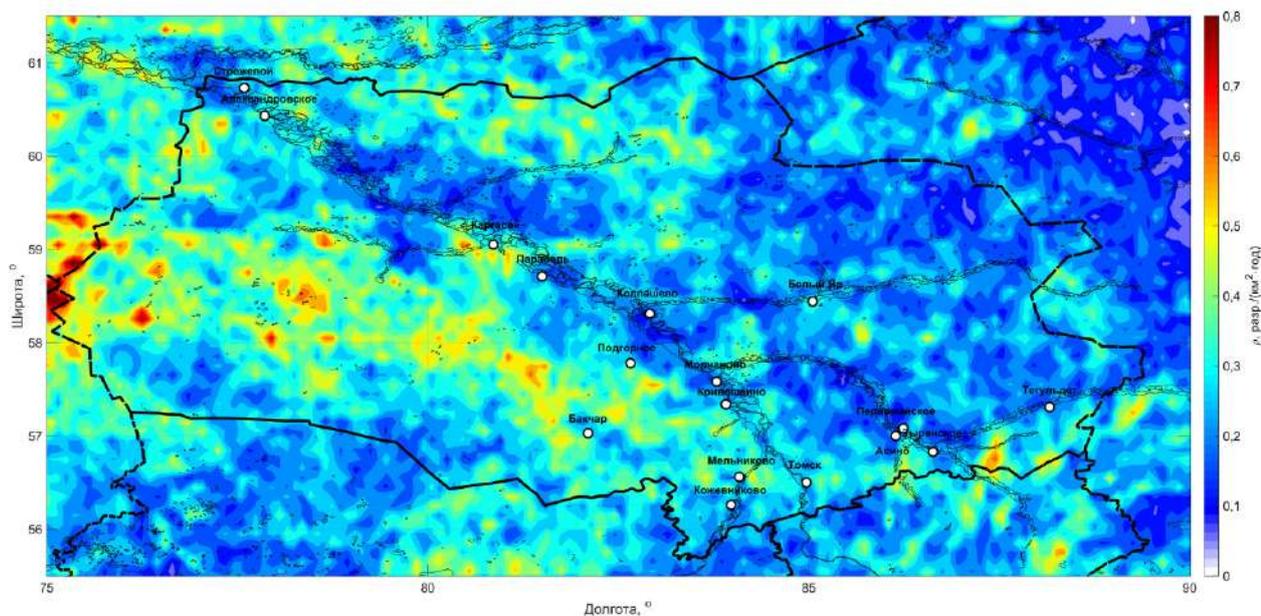


Рис. 1. Пространственное распределение плотности разрядов молний ( $\rho$ , разр./(км<sup>2</sup>/год)) над Томской областью, построенное по данным грозопеленгационной сети WWLLN за весь исследуемый период (2016–2020 гг.).

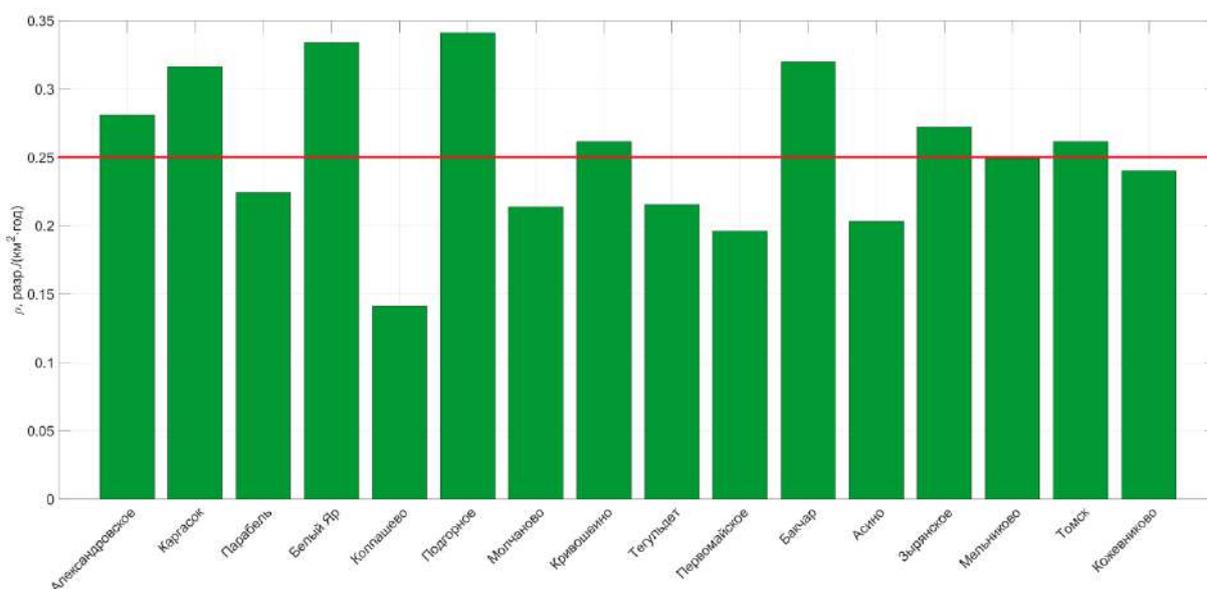


Рис. 2. Плотность разрядов молний ( $\rho$ , раз./ $(\text{км}^2\text{год})$ ) для административных центров Томской области, рассчитанная по данным WWLLN за период 2016–2020 гг. Красная горизонтальная линия соответствует среднеарифметическому значению плотности молний на исследуемой территории.

Исследование плотности разрядов молний на территории Томской области по данным WWLLN за 2016–2020 гг. показало, что грозовая активность увеличивается с востока на запад. При этом можно выделить четыре крупных очага грозовой деятельности, которые расположены над Васюганской равниной, над юго-востоком Среднеобской низменности, над юго-западом Кетско-Тымской равнины и над северо-западной периферией отрогов Кузнецкого Алатау.

Самая высокая плотность молниевых разрядов наблюдается на западе Томской области. Расположение данного максимума хорошо согласуется с северо-восточной периферией Большого Васюганского Болота, являющегося одним из самых больших болот в мире (Васюганское..., 2003). Повышенная плотность разрядов над юго-востоком области объясняются, главным образом, влиянием орографического фактора.

Проведена оценка грозовой активности для административных центров Томской области (рис. 2). Расчёт плотности молний проводился для зоны радиусом 5 км в центре каждого населённого пункта. Анализ показал, что максимальное значение отмечается в с. Подгорное и составляет (0,34 раз./ $(\text{км}^2\text{год})$ ), а самое низкое значение наблюдается в г. Колпашево (0,14 раз./ $(\text{км}^2\text{год})$ ). Плотность разрядов выше среднего, кроме с. Подгорное, также отмечается в рп. Белый Яр, с. Бакчар, с. Каргасок, с. Александровское, с. Зырянское, г. Томске и с. Кривошеино.

### Литература

1. Васюганское болото (природные условия, структура и функционирование). 2-е изд., под ред. Л.И. Инишевой. Томск: ЦНТИ, 2003. 212 с.
2. Горбатенко В.П. Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над территорией Западной Сибири / В.П. Горбатенко, Т.В. Ершова, Д.А. Константинова // Вестник томского государственного университета. 2009. № 329. С. 251–255.
3. Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Иннокентьев Д.Е. Анализ 11-летней динамики пространственного распределения плотности молний в Северной Азии / Л. Д. Тарабукина, В. И. Козлов, Д. Е. Иннокентьев // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. Науки. 2021. Т. 34. №1. С. 159–173.
4. Global Hydrology Resource Center (GHRC). – URL: <https://ghrc.nsstc.nasa.gov/pub/lis/climatology/LIS-OTD/HRFC/>.
5. Karanina S. Yu. Spatial and temporal distribution of lightning discharges over Tomsk region according to WWLLN data for 2010-2015 / S. Yu. Karanina, N. Kocheeva, M. Belikova, N. Baranovskiy // Advances and Applications in Statistics. – 2018. V. 52, № 5. pp. 339–362.
6. Tarabukina L.D. Spatial Pattern of Lightning Strikes in North Asia / L.D. Tarabukina, V.I. Kozlov, R.R. Karimov, V. A. Mullayarov // Russian Meteorology and Hydrology. – 2017. – V. 42, №. 2, – P. 88–94.
7. Virts, K. S., Wallace J.M., Hutchins M.L., Holzworth R.H. Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2013. – V. 94. –P. 1381–1391.
8. WWLLN – World Wide Lightning Location Network. – URL: <http://webflash.ess.washington.edu/>.

## ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО РАЗВИТИЮ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Д.В. Гусак

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия, vydigus@mail.ru*

Чистота окружающей среды является жизненно необходимым условием для жизни, здоровья и высокой работоспособности населения. Технологическое развитие предоставило много возможностей для людей, но при этом, загрязнило среду обитания человека. Это необходимо исправлять. В данной работе рассмотрена организация государственной сети наблюдений и предложен подход к её дополнению с целью увеличения пространственного разрешения наблюдений и выделения участков сети за определенным объектом наблюдений.

*Ключевые слова: прибор мониторинга, сеть наблюдений, окружающая среда, мониторинг воздуха, распределенная сеть.*

Purity of the environment is a vital condition for the life, health and high productivity of population. Technological development provided many opportunities for people, but at the same time, polluted the human habitat. This needs to be corrected. This work considers the organization of the state network of observations and proposes an approach to its addition in order to increase the spatial resolution of observations and identify sections of the network for a certain object of observations.

*Keywords: monitoring device, observation network, environment, air monitoring, distributed network.*

Для людей жизненно необходимо поддерживать чистоту своей среды обитания. Одним из её компонентов является атмосферный воздух. В ходе своего развития, человечество осваивает новые технологии производства, отстраивает предприятия, следит за их деятельностью. Ограничительными мерами выступают такие параметры как предельно допустимые выбросы предприятий и предельно допустимые концентрации различных веществ (ПДК). Качество воздуха оценивают по концентрациям, регистрируемым приборами на постах наблюдений, входящих в государственную систему наблюдений, воздействию которых подвергается население.

Состояние атмосферного воздуха контролируют на постах наблюдений, которые принадлежат Государственной службе наблюдений за состоянием окружающей среды. Посты предназначены для контроля таких загрязнителей воздуха как: диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ), оксиды азота ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ), оксид углерода ( $\text{CO}$ ), пыль, формальдегид, бенз(а)пирен и др. Их устанавливают в соответствии с требованиями РД 52.04.186-89. Количество постов мониторинга зависит от следующих факторов: численность городского населения, площадь населенного пункта, рельеф местности, степень индустриализации, рассредоточенность мест отдыха (Руководство..., 1991).

Рассмотрим реализацию сети наблюдений в городе Томске. На (рис. 1) красными точками отмечено расположение 6 постов наблюдений, всего в городе 7 постов. Посты разбиты на категории: «городские фоновые» (№ 14), «промышленные» (№№ 5, 11, 12, 13), «авто» (№№ 2, 15). Данные посты регистрируют разовые концентрации 13 веществ, в том числе: пыли,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ , формальдегида, бенз(а)пирена по неполной программе наблюдений (О состоянии..., 2020).



Рис. 1. Расположение постов наблюдений

В докладах об экологической ситуации в Томской области за 2019 и 2020 годы (О состоянии..., 2020; Об экологической..., 2021) указано: «Застройка города и размещение предприятий не позволяют сделать четкого разделения постов наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха». Размещать дополнительные стационарные посты наблюдений достаточно затратно ввиду их высокой стоимости (млн. руб.), необходимости формирования и выделения определенных

площадок, которые требуют отчуждения территории. В дополнение к стационарным постам используют маршрутные, которые используют маршрутные посты наблюдений, которые отбирают пробы воздуха в определенных точках для их лабораторного анализа.

Автор предлагает подход к повышению эффективности сети наблюдений с повышением детализации данных о состоянии атмосферного воздуха в городе. Предложение заключается в создании устройства малых габаритных размеров с невысокой стоимостью (до двух десятков тыс. руб.), к которому модульно подключают датчики веществ, обладающие достаточной точностью (погрешность до 25 %, согласно ГОСТ 17.2.4.02-81 (Атмосфера..., 2004). Необходимость развития подобных сетей в городах России описывали в работе (Ревич, 2018).

По принципу работы, наиболее распространены электрохимические датчики, но появляются и оптические датчики веществ. Оба типа датчиков обладают высокой точностью измерений, малыми размерами, но разным сроком службы, стоимостью и диапазоном определяемых веществ. Электрохимические датчики служат 1–2 года, находятся в ценовом диапазоне от единиц до полутора десятка тыс. руб., определяют основные загрязняющие вещества (Руководство..., 1991):  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ , а также другие вещества, представляющие интерес:  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_{12}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\Sigma\text{CH}$  и др. Оптические датчики служат более 3 лет и находятся в ценовом диапазоне единиц тыс. руб. На данный момент,

созданы датчики для определения взвешенных частиц (ВЧ, particulate matter, PM) и оксида углерода.

Оптические датчики из-за преимуществ принципа работы, а именно: более высокий срок службы, точность и меньшая стоимость, представляют больший интерес при выборе датчиков веществ. Однако, данный факт не исключает возможность использования в устройстве электрохимических датчиков. Необходимо учитывать экономические затраты на обслуживание устройства при выборе датчиков. К тому же, их следует калибровать сертифицированным прибором для использования в подобной сети.

Для реализации подхода с вышеописанными типами датчиков, разработана структурная схема, представленная на (рис. 2) и воплощена рабочая модель устройства, представленная на (рис. 3).

Для первичной проверки работоспособности устройства, в нем предусмотрен индикатор, на который выводятся данные с датчиков. Блок управления зарядом предусмотрен на случай подключения питания от сетевого напряжения – в нем необходимо преобразовать амплитуды напряжения и тока, т.к. разные модули могут требовать для работы разные величины данных параметров. Наблюдению подлежит как внешняя окружающая среда (основная цель), так и внутренняя среда устройства для обеспечения нормальных условий работы и, следовательно, минимальной погрешности. Для этого в блоке внутренних измерений необходимо разместить датчик температуры и систему её регулирования.



Рис. 2. Структурная схема устройства



Рис. 3. Рабочая модель

Накопитель данных в виде SD-карты служит буфером перед отправкой определенного объема данных. Это уменьшит количество обращений к передатчику данных и затраты на саму передачу. Предусматривается запись файла-отчета о работе компонентов устройства (log-файл).

В рабочей модели использован оптический датчик взвешенных частиц PMS5003, который определяет концентрации частиц по рассеянному излучению посредством построения кривой рассеяния света с изменением во времени. Датчик выдает значения в мкг/м<sup>3</sup>. Дополнением к датчику выступает модуль часов реального времени, который позволяет, как выводить значения даты и времени измерений на экран, так и заносить их на карту памяти. Для создания первичной рабочей модели использован микроконтроллер Arduino Uno. Сбор данных производится на SD-карту.

Такое устройство возможно размещать с заданной пространственной плотностью, к примеру, для детального мониторинга определенных улиц, через каждые 100 метров. Установка достаточного количества устройств позволит не только выделять определенные районы за исследуемым объектом, выбрасывающим в атмосферу газы, но и отслеживать область распространения выбросов. При выделении области распространения загрязняющих газов при известных концентрациях веществ, можно будет сделать выводы о необходимости и путях очистки состава выбросов, то есть, уменьшения в последних концентраций загрязняющих веществ, представляющих опасность для здоровья населения. Такая сеть послужит гарантом соответствия фактических объемов выбросов и содержания в них определенных веществ, как для контролирующих органов, так и для предприятий.

Благодаря наличию в сети датчика температуры, давления и влажности, сеть послужит целям гражданской обороны, т.к. причинами регистрации резкого повышения давления (взрыв) и температуры (излучение, пожар) сразу на нескольких датчиках по некото-

рой окружности, могут послужить: происшествие на предприятии, авария, диверсия, а в крайнем случае – локальная бомбардировка. При возникновении первых трех ситуаций, необходимо, чтобы службы МЧС первыми узнали об угрозе для населения.

Во время применения устройства для мониторинга, датчики, применяемые в нем, необходимо калибровать с периодичностью, в чем может помочь маршрутный пост наблюдений, т.к. установка сети мониторинга снизит необходимость в применении маршрутных постов.

### Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Томской области в 2019 году» // Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, ОГБУ «Облкомприрода». Томск: 2020. 135 с.
2. Государственный доклад «Об экологической ситуации в Томской области в 2020 году» // Департамент природных ресурсов и охраны окружающей среды Томской области, ОГБУ «Облкомприрода». Томск: 2021. 133 с.
3. ГОСТ 17.2.4.02-81 Охрана природы ССОП. Атмосфера. Общие требования к методам определения загрязняющих веществ. – Введ. 1982.07.01. Официальное издание Охрана природы. Атмосфера: Сб. ГОСТов. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004 год. 2 с.
4. РД 52.04.186-89 Руководство по контролю загрязнения атмосферы.– Введ. 1991.07.01. – Госкомгидромет СССР, Министерство здравоохранения СССР. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. 694 с.
5. Ревич Б.А. Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2018. №3. С. 53 – 78.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ ЮЖНОЙ СИБИРИ И СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

Н.В. Долгова, М.А. Волкова\*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия,  
nata.dolgova59@gmail.com, \*mv2101@mail.ru*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 p\_a.

Рассмотрены характеристики температурно-влажностного режима (средняя температура воздуха и почвы, суммы температур более 5 °С и 10 °С, суммы осадков, коэффициент Г.Т. Селянинова ГТК, коэффициент увлажнения С.А. Сапожниковой, индекс сухости М.И. Будыко) за период май-сентябрь 1971–2019 гг. Отмечаются статистически значимые тенденции увеличения тепловых ресурсов на рассматриваемой территории. Линейные тренды не отражают значимых изменений показателей увлажнения. Сравнение полей распределения увлажнения за десятилетия 1971–1980 гг. и 2010–2019 гг. показало заметное продвижение засушливой зоны с территории северного Казахстана в направлении юга Западной Сибири и рост увлажнения на территории республики Тыва.

*Ключевые слова: изменение климата, ландшафтные зоны, гидротермический коэффициент Селянинова, индекс сухости Будыко, коэффициент увлажнения Сапожниковой*

The characteristics of the temperature and humidity regime (average temperature of air and soil, sums of temperatures above 5 °C and 10 °C, sums of precipitation, G.T. Selyaninov's coefficient, S.A. Sapozhnikova's moisture coefficient, M.I. Budyko's dryness index) are considered for the period May-September 1971–2019. Statistically significant trends in the increase in heat resources are observed in the territory under consideration. Linear trends did not reveal significant changes in moisture parameters. Comparison of moisture distribution fields for the decades 1971–1980 and 2010–2019 showed a noticeable advancement of the arid zone from the territory of northern Kazakhstan towards the south of Western Siberia and an increase in moisture in the territory of Tyva.

*Keywords: climate change, landscape zones, Selyaninov hydrothermal coefficient, Budyko dryness index, Sapozhnikova moisture coefficient*

Наблюдаемые изменения глобального и регионального климата в комплексе с антропогенными и природными факторами оказывают влияние на состояние и функционирование компонентов экосистем, на распространение биоты, продуктивность и её сезонные изменения. В основу оценки уровня изменения климата и его влияния на природные экосистемы заложено представление о том, что условия существования биомов определяется, главным образом, теплообеспеченностью в вегетационный период, суровостью зим и влагообеспеченностью, варьирующих в определенных пределах (Титкова, Виноградова, 2015).

В ряде работ показано, что в период современного потепления климата происходит смещение к северу климатических зон (Худяков, Решоткин, 2017). В докладе МГЭИК (Изменения климата..., 2013), приведены выводы относительно современной климатогенной динамики степной зоны. Отмечается усиление аридизации степей на фоне роста глобальной температуры в различной степени. В то же время, в исследовании (Курбатская и др., 2012) обнаружено, что некоторые участки внутриконтинентальных степей характеризуются накоплением биомассы вследствие роста увлажненности на фоне роста температуры.

Целью работы является исследование тенденций температурно-влажностного режима на территории южной Сибири и Казахстана.

Территория исследования располагается в пределах

50°с.ш. – 55°с.ш. и 60°в.д. – 110°в.д. Протяжённость территории с севера на юг обуславливает распределение различных природных зон и горных областей высотной поясности: тайга, смешанные леса, лесостепь и степь.

Материалами для исследования послужили точные данные по температуре воздуха и атмосферным осадкам, а также срочные данные по температуре почвы регулярной метеорологической сети по 32 станциям за май-сентябрь 1971–2019 гг. из архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (Всероссийский..., 2019).

Расчет и оценка линейных трендов температурных характеристик показали, что наблюдается статистически значимые (на уровне значимости 5 %) тенденции увеличения тепловых ресурсов на рассматриваемой территории. Так, средняя температура воздуха за период май – сентябрь по территории увеличивается со скоростью 0,2–0,4 °С/10 лет (рис.1).

Скорость изменения сумм температур больше 5 °С находится в пределах от 12,4 °С/10 лет на станции Солонешное до 75,7 °С/10 лет на станции Улан-Удэ (рис. 2). В среднем со скоростью 50–55 °С/10 лет происходит увеличение сумм температур воздуха больше 10 °С. Также отмечается рост температуры почвы со скоростью в пределах от 0,2 °С/10 лет до 0,7 °С/10 лет. Наибольший рост температуры почвы отмечается на станциях Жигалово и Улан-Удэ (0,7 °С/10 лет).

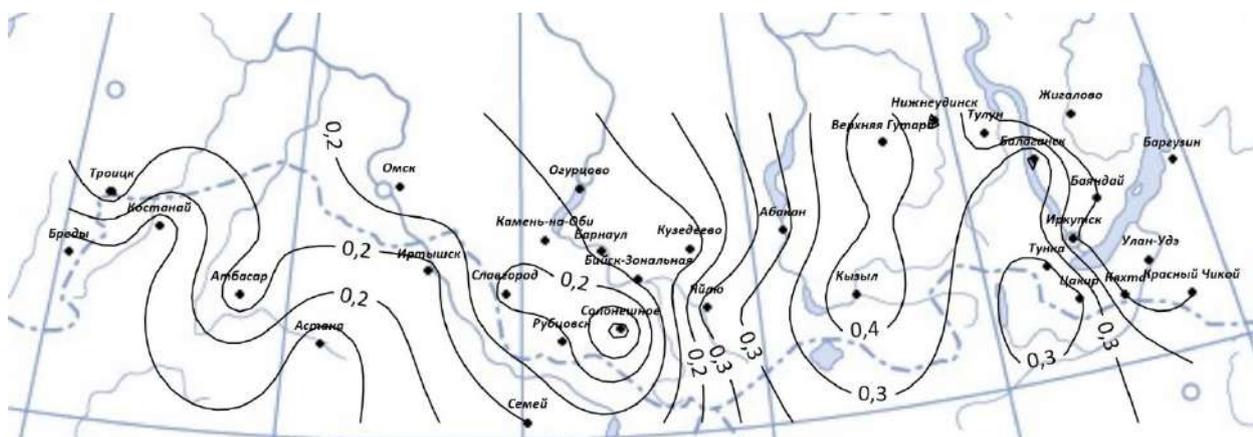


Рис. 1. Пространственное распределение скорости изменения температуры воздуха за май-сентябрь ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет)

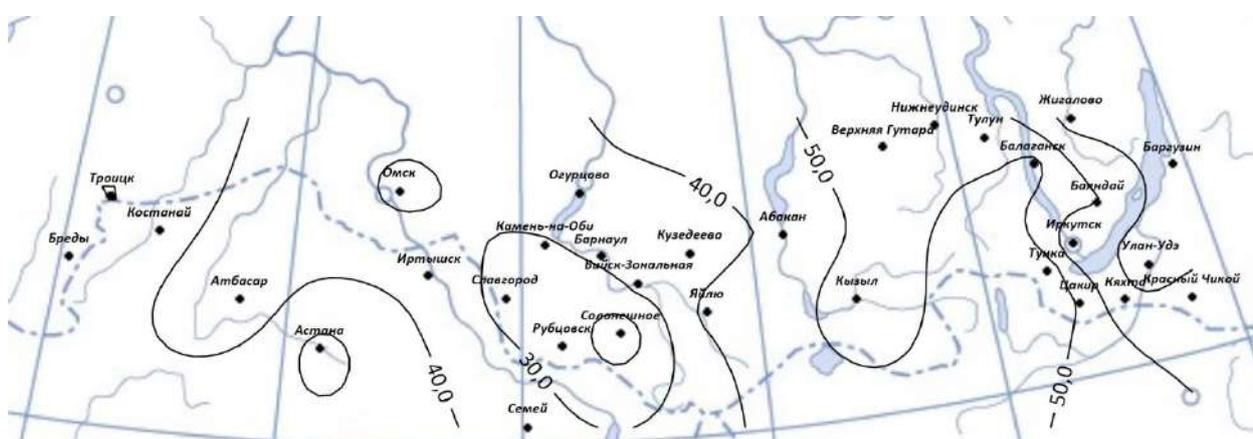


Рис. 2. Пространственное распределение скорости изменения сумм температур воздуха больше  $5^{\circ}\text{C}$  ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет)

Оценка динамики сумм осадков за май-сентябрь показала на большей части территории тенденцию к увеличению со скоростью до  $18.1$  мм/10 лет (ст. Верхняя Гутара). На 10 рассматриваемых станциях (большая часть Алтайского края и республики Алтай) зафиксированы отрицательные тренды со скоростью до  $-12.0$  мм/10 лет (ст. Яйлю).

Увлажненность территории определяется соотношением приходной и расходной составляющих водного баланса почв, т. е. соотношением суммы осадков и испарения. Испарение в значительной мере зависит от температуры и влажности воздуха, облачности, скорости ветра и других факторов (Грингоф, Павлова, 2013). В качестве характеристики увлажненности используют различные показатели в виде тех или иных функций от суммы осадков и максимально возможного испарения. Среди известных показателей рассмотрим гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК), индекс сухости Будыко (ИС) и коэффициент увлажнения Сапожниковой (КУ).

На рассматриваемой территории складываются различные условия тепловлагообеспеченности. Рас-

сматривая пространственное распределение ГТК по исследуемой территории следует отметить, что вся территория Северного Казахстана расположена в засушливой зоне со значениями  $0,5-0,7$ . К переувлажнённой зоне относится северо-восточная часть рассматриваемой территории (ст. Иркутск, Тунка, Тулун и др.) и станция Яйлю (республика Алтай). К умеренно влажной зоне (ГТК составляет  $1.2-1.5$ ) относятся такие станции как: Балаганск, Жигалово, Кяхта. Максимальное значение ГТК наблюдается на станции Верхняя Гутара (Иркутская область) и составляет  $3.0$  (переувлажнённая зона). Расчет и оценка линейных трендов показала слабовыраженные статистически незначимые тенденции ГТК. При этом, сравнение ГТК за два десятилетия  $1971-1980$  гг. и  $2010-2019$  гг. показало заметное продвижение засушливой зоны на расстояние до  $250$  км (в районе ст. Омск) с районов Северного Казахстана на территорию юга Западной Сибири (рис. 3). Кроме этого происходит смещение переувлажнённой зоны ( $\text{ГТК} \geq 1,6$ ) с севера Иркутской области (станции Верхняя Гутара, Нижнеудинск) на юг территории (Республика Хакасия, Тыва).

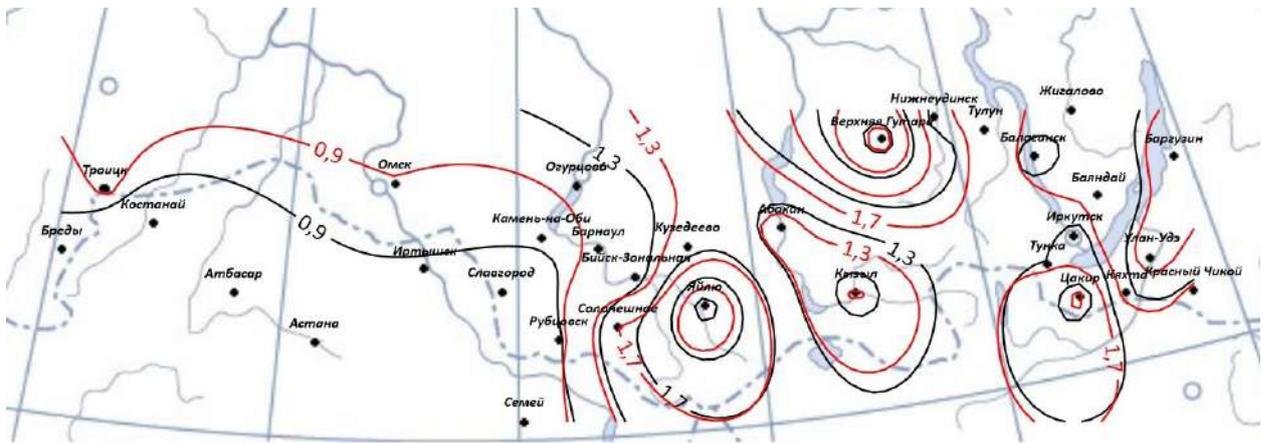


Рис. 3. Пространственное распределение индекса ГТК за десятилетия 1971–1980 и 2010–2019 гг.

Коэффициент увлажнения С.А. Сапожниковой изменяется по территории в диапазоне от 0,4 (ст. Кызыл) до 2,0 (ст. Яйлю). Аналогично ГТК, скорость изменения КУ не отражает значимых тенденций в изменении увлажнения территории. Сравнение десятилетий до 1980 года и после 2010 года показало наступание более засушливой зоны с районов Северного Казахстана и юга Западной Сибири (Иртышск, Славгород) в северном направлении (Омская, Новосибирская области). При этом отмечается увеличение зоны избыточной влажности в районе Республики Алтай, Алтайском крае и Кемеровской области (ст. Яйлю, ст. Солонешное, ст. Кузедеево).

Среднее значение индекса сухости М.И Бudyко за период 1971–2019 гг. находится в диапазоне от 0,4 на станции Яйлю до 1,9 на станции Кызыл. На большей части территории отмечаются изменения ИС. Сравнение пространственного распределения индекса сухости по десятилетиям показало, что в последнее десятилетие заметно уменьшение (в среднем на 10 %) засушливости в районе Республики Тыва. Так, значение индекса сухости в десятилетие 1971–1980 гг. составило 2,0, а в период с 2010–2019 гг. – 1,8.

Комплексный анализ характеристик температурно-влажностного режима на территории Южной Сибири и Северного Казахстана позволяет сделать вывод: на фоне повсеместного роста температурных показателей и тенденции увеличения осадков за период с мая по сентябрь на большей части территории, фиксируется продвижение засушливой зоны (зоны степей) с территории северного Казахстана в направлении на юг Западной Сибири (Омская, Новосибирская области), а также, рост увлажнения на территории Республики Тыва.

### Литература

1. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/date/162-temperature-precipitation> (дата обращения 20 января 2020).
2. Грингоф И.Г., Павлова В.Н. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том 3. Основы сельскохозяйственной метеорологии Учебное пособие. // Обнинск, ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2013. 384 с.
3. Изменения климата, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Стокер Т.Ф., Цинь Д., Платтнер и др. Кембридж юниверсити пресс, Кембридж, Соединенное Королевство и Нью-Йорк, США. 2013. 222 с.
4. Курбатская С.С., Прудникова Т.Н., Монгуш Ч.О., Курбатская С.Г. Анализ изменений пастбищных угодий Тувы и их продуктивности с учетом климатических особенностей // Экосистемы Центральной Азии: исследования, сохранение, рациональное природопользование: материалы XI Убсунурского междунар. симп. Кызыл: РИО Тувинского гос. ун-та, 2012. С. 3–8.
5. Титкова Т.Б., Виноградова В.В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
6. Худяков О.И., Решоткин О.В. Эволюция почв в связи с современным потеплением климата // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 2. С. 38–43.

## СТРУКТУРА ВЕРШИН МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ НАД ЮГОМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА CALIPSO

Д.Ф. Жуков<sup>1,2</sup>, К.Н. Пустовалов<sup>1,3</sup>, Т.С. Кошикова<sup>3</sup>, П.М. Нагорский<sup>3</sup>, М.В. Оглезнева<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия <sup>2</sup>Сибирский центр  
ФГБУ «НИЦ «Планета», Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия  
den1szhukov@yandex.ru, const.pv@yandex.ru, tkoshikova@gmail.com, npm\_sta@mail.ru, oglezneva.m@yandex.ru

Исследования поддержаны грантом Президента РФ (МК-489.2020.5).

В работе приведены результаты исследования особенностей характеристик мезомасштабных конвективных систем над югом Западной Сибири по данным лидара CALIOP (спутник CALIPSO). В качестве исследуемых были выбраны следующие характеристики МКС: горизонтальная протяжённость верхней кромки МКС, высота верхней границы, полное излучение обратного рассеяния и оптическая плотность облачности. Все они были получены из продуктов спутника CALIPSO, по трём уровням обработки – 1В, 2 и 3.

*Ключевые слова:* мезомасштабные конвективные системы, МКС, спутник CALIPSO, лидар CALIOP, юг Западной Сибири

The work presents the results of studying the features of the characteristics of mesoscale convective systems over the south of Western Siberia according to the CALIOP lidar (CALIPSO satellite). The following characteristics of the ISS were selected as investigated: the horizontal extent of the upper edge of the ISS, the height of the upper edge, total backscatter radiation and optical density of clouds. All of them were obtained from the CALIPSO satellite products, at three processing levels – 1B, 2 and 3.

*Keywords:* mesoscale convective systems, MCS, CALIPSO satellite, CALIOP lidar, south of Western Siberia

Во второй половине XX – начале XXI вв. в регионах Северной Евразии, отмечалось увеличение доли конвективных облаков (Chernokulsky et al., 2011). Сохранение данной тенденции приведёт к дальнейшему увеличению повторяемости конвективных облаков и связанных с ними неблагоприятных и опасных явлений: грозы, града, интенсивных ливневых осадков, шквалов и др. Наиболее опасными проявлениями конвективной облачности являются мезомасштабные конвективные системы (МКС) (Вельтищев, Степаненко, 2006). На сегодняшний день МКС на данной территории исследованы недостаточно, в частности нет детальных оценок структуры вершин (наковален) МКС, с чем, в частности, могут помочь данные лидара CALIOP (спутник CALIPSO). В связи с этим, исследование МКС и связанных с ними явлений на территории юга Западной Сибири является весьма нужным и актуальным.

Целью данной работы является определение характеристик мезомасштабных конвективных систем над югом Западной Сибири по данным спутника CALIPSO за период 2010–2019 гг.

Для исследования были использованы следующие данные:

- 1) база данных о случаях прохождения МКС над югом Западной Сибири;
- 2) спутниковые изображения в видимой части спектра (RGB-композиции), полученные по данным спектрорадиометров MODIS (спутник Aqua) и VIIRS (спутник Suomi NPP), на портале EOSDIS Worldview (EOSDIS Worldview);
- 3) продукты второго уровня обработки и уровня обработки 1В, полученные по данным лида-

ра CALIOP (спутник CALIPSO) (Atmospheric Science Data Center).

На первом этапе на основе спутниковых изображения в видимой части спектра, полученных по данным дневных пролётов спутников Aqua и Suomi NPP производилось дешифрирование случаев прохождения МКС, синхронизированных с пролётами спутника CALIPSO над югом Западной Сибири. Всего за период за период 2010–2019 гг. было отобрано 28 случаев прохождения мезомасштабных конвективных систем.

Затем для отобранных случаев с сайта NASA были получены продукты второго уровня обработки и уровня обработки 1В, рассчитанные по данным лидара CALIOP.

Далее проходило написание специальных скриптов в среде MATLAB для визуального представления масок облачных и аэрозольных слоёв и типов облачности, а также полного излучения обратного рассеяния и оптической плотности в пределах МКС. Результатом этого этапа стал набор тематических изображений (вертикальных профилей и графиков) по каждому перечисленному параметру. Пример этих тематических изображений представлен на (рис. 1).

На заключительном этапе исследования на основе построенных по данным CALIPSO тематических изображений проводился расчёт статистических параметров характеристик МКС и производился их комплексный анализ. На основе времени начала и окончания пролёта спутника над рассматриваемыми объектами и известной скорости спутника CALIPSO (27036 км/ч) вычислялась горизонтальная протяжённость отобранных МКС вдоль трека CALIPSO. Рассмотрим детально полученные результаты на примере типичного случая МКС (рис. 1).

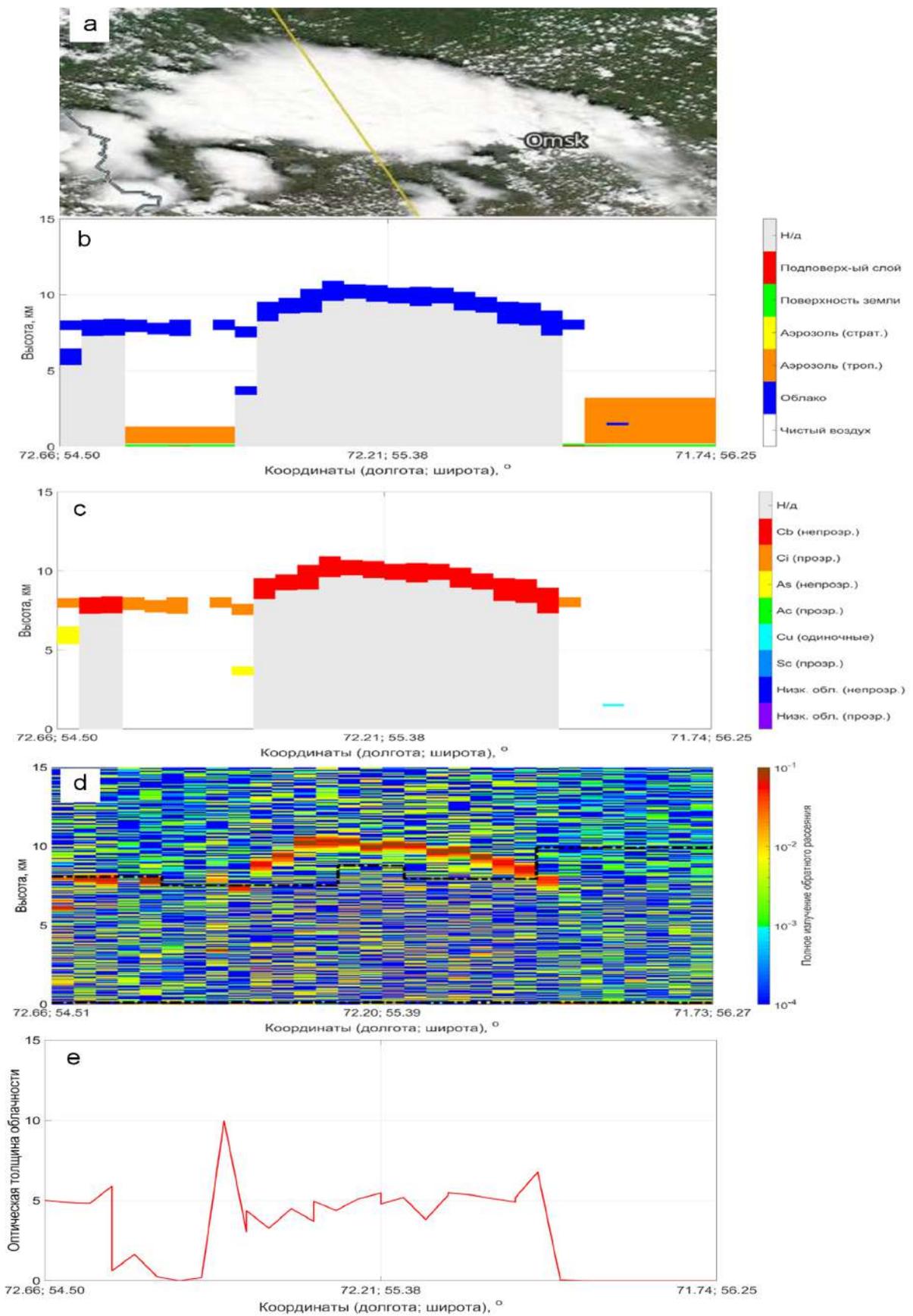


Рис. 1. RGB-изображение МКС (а) по данным спектрорадиометра MODIS (спутник Aqua), а также маска слоёв облачности и аэрозоля (b), маска типов облачности (c), профиль полного излучения обратного рассеяния (d) и изменение оптической плотности (e) по данным лидара CALIOP (спутник CALIPSO) за 11.06.2012 г.

Согласно (рис. 1), рассматриваемый объект определяется на основе лидарных данных как скопление кучево-дождевых облаков, в периферийных частях которого имеются относительно тонкие слои перистых облаков. Горизонтальная протяжённость данного МКС составила ~135 км. Верхняя граница МКС находится в пределах от 8 до 11 км. Сравнение высоты верхней границы представленного МКС и средней высотой тропопаузы по данным реанализа MERRA (7÷9 км) показало, что вершина МКС располагается на 1–3 км выше тропопаузы. Таким образом, имеет место выгибание тропопаузы вершиной МКС с возможным её «пробитием». По изображению вертикального про-

филя полного излучения обратного рассеяния можно сделать вывод о том, что облачная система МКС даёт самые высокие значения полного излучения обратного рассеяния. Оптическая плотность объекта, то есть степень препятствия прохождения сквозь него света, в центральной части облачной системы МКС имеет относительно не высокие значения – от 4 до 6. При этом на границах облачной системы оптическая плотность увеличивается до 7–10.

В (табл. 1) приведены средние значения статистических характеристик высоты верхней границы отобранных случаев МКС по данным лидара CALIOP и высоты тропопаузы по данным реанализа MERRA.

Таблица 1. Статистические характеристики высоты верхней границы МКС над югом Западной Сибири

Высота ВГО МКС по данным лидара CALIOP				Высота тропопаузы по данным реанализа MERRA				Отношение средних значений высот	D ср.	D P95
Ср.	Мед.	P5	P95	Ср.	Мед.	P5	P95			
10,5	10,6	9,4	11,1	10,3	10,3	10,1	10,5	1,02	0,20	0,66

Примечание. Ср. – среднее, мед. – медиана, P5 и P95 – процентиля 5 и 95 соответственно.

В целом по всем случаям были отмечены следующие особенности характеристик мезомасштабных конвективных систем (комплексов) над югом Западной Сибири по данным спутника CALIPSO:

- горизонтальная протяжённость: среднее – 155 км, абсолютный максимум – 405 км, абсолютный минимум – 81 км;
- высота верхней границы: общее среднее – 10,5 км, средние минимум и максимум – 9,45 и 11,1 км, диапазон типичных значений – 10,2÷10,8 км;
- в 2/3 рассмотренных случаев средняя высота верхней границы МКС превышала высоту тропопаузы – наблюдалось выгибание МКС тропопаузы с возможным пробитием. Средняя величина выгибания по всем объектам – 0,2 км, средний максимум – 0,6 км, а максимум в отдельных случаях достигал 2 км;

Сравнение значений горизонтальной протяжённости и высоты верхней границы МКС по данным спутника CALIPSO с аналогичными, рассчитанными по данным MODIS и описанными в (Koshikova, Zhukova, 2020; Koshikova et al., 2021), показало их хорошее согласие.

## Литература

1. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. М.: МГУ, 2006. 101 с.
2. Atmospheric Science Data Center: [Электронный ресурс]. URL: <https://asdc.larc.nasa.gov> (дата обращения: 07.02.2021).
3. Chernokulsky A.V., Bulygina O.N., Mokhov I.I. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations // Environ. Research Letters. 2011. V. 6, No 3. pp. 035202.
4. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс].– URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (дата обращения: 06.12.2020).
5. Koshikova T.S., Pustovalov K.N., Zhukova V.A., Kuzhevskaya I.V., Nagorskiy P.M. The spatio-temporal distribution of mesoscale convective complexes over the Southeastern Western Siberia// Geosphere Research. 2021, No 3, pp. 115–124
6. Koshikova T.S., Zhukova V.A. Estimation of the characteristics of mesoscale convective complexes over the south of Western Siberia based on MODIS data // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. pp. 1156072-1–1156072-4.

## КЛИМАТ ГЕОПАРКА ЮНЕСКО «ЯНГАН-ТАУ» И ЕГО СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Р.Г. Камалова, Л.Н. Белан, Е.А. Богдан

*Башкирский государственный университет, Уфа, Россия, galim-rita@yandex.ru*

В статье проанализированы климатические условия геопарка «Янган-Тау» (Республика Башкортостан) и их изменения в период 1966–2019 гг. Исследования по климату в геопарках, как образцах «устойчивых территорий», в настоящее время становятся необходимым научным подспорьем для достижения целей устойчивого развития, в частности цели №13. В связи с этим для геопарка «Янган-Тау» проведена оценка трендов температуры воздуха, суммы атмосферных осадков, гидротермических условий. Выявленные тенденции климатических величин определяют направления сезонных изменений: в холодный период наблюдается смягчение климата, в летний сезон – нарастание засушливости.

*Ключевые слова:* температура воздуха; атмосферные осадки; геопарк «Янган-Тау»; изменение климата; цели устойчивого развития; Башкортостан.

The article analyzes the climatic conditions of the Yangan-Tau Geopark (Republic of Bashkortostan) and their changes in the period 1966–2019. Climate research in Geoparks is now becoming a necessary scientific support for achieving sustainable development goals, in particular Goal 13. In this regard, for the Yangan-Tau Geopark, an assessment of air temperature trends, the amount of precipitation and moisture conditions was carried out. The revealed tendencies of climatic values determine the directions of seasonal changes: in the cold period, climate softening is observed, in the summer season – an increase in aridity.

*Keywords:* air temperature; atmospheric precipitation; «Yangan-Tau» geopark; climate change; sustainable development goals; Bashkortostan.

Анализ последствий и адаптации природной среды к глобальным и региональным изменениям климата является главным посылом в «Оценочных докладах» Межправительственной группы экспертов по изменению климата (<https://www.ipcc.ch/>) и Росгидромета (<https://cc.voeikovmgo.ru/>). Изменения климата влияют как на природную среду в целом, так и на протекающие в ней природные процессы. Поэтому актуальными становятся вопросы об адаптации к ним охраняемых объектов живой и неживой природы. Особенно важно сохранить ландшафтные комплексы уникальных природных объектов. Одним из таких объектов в Республике Башкортостан является созданная в 2017 году устойчивая территория – геопарк «Янган-Тау» – первый в России и на всём постсоветском простран-

стве геопарк под эгидой ЮНЕСКО.

На территории геопарка площадью в 1774 тыс.км<sup>2</sup> располагаются более 40 геологических объектов, из которых 3 (разрез Мечетлино, разрез Большая Лука, гора Янган-Тау) имеют международную, 10 – национальную и 21 объект – образовательную значимость. Мировую известность также имеют бальнеологические ресурсы, связанные с геотермальным феноменом горы Янгантау (рис. 1). Геопарк «Янган-Тау» находится в геотектоническом отношении на стыке Русской равнины (Уфимское плато) и Южного Урала, в ландшафтно-географическом – в горно-лесной зоне, в административном – в Салаватском районе Республики Башкортостан (Bogdan et al., 2019).

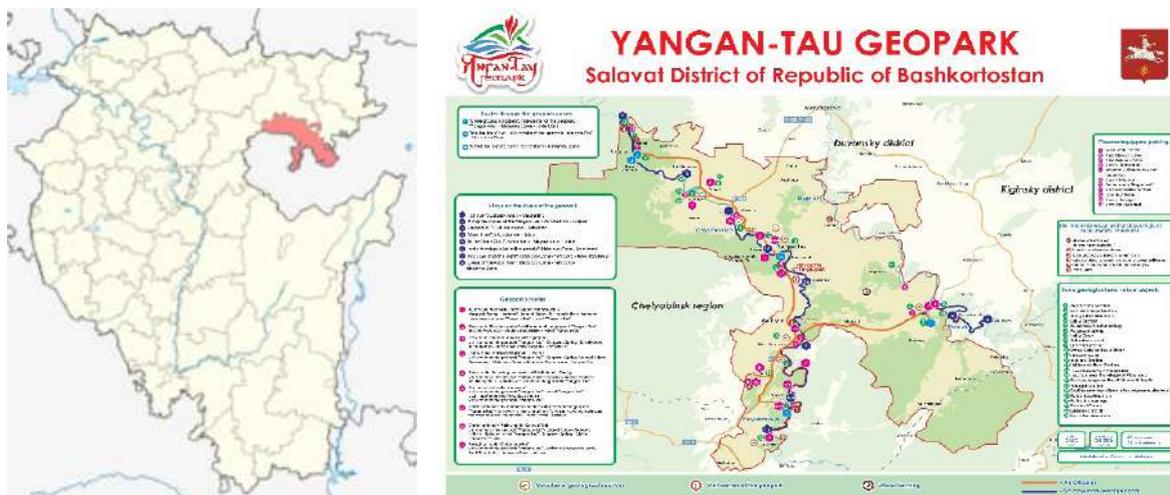


Рис. 1. Месторасположение и картосхема достопримечательностей геопарка «Янган-Тау»

Одной из ключевых позиций в деятельности геопарка становится сохранение уникальных геологических объектов и редких представителей флоры и фауны южно-уральского региона, а также оценка последствий региональных изменений климата и адаптации к ним природных комплексов. Это, в свою очередь, необходимо для реализации целей устойчивого развития, разработанных в 2015 гг. Генеральной ассамблеей ООН. Одна из целей – № 13 «Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями». В связи с этим исследования климата геопарка и подобных территорий являются важным научным заданием для разработки и продвижения секвестрационных мероприятий.

Главной целью настоящего исследования является изучение климата территории геопарка «Янган-Тау» и его изменений в современный период. В связи с этим были проанализированы данные многолетних наблюдений метеорологической станции Дуван в период 1966–2019 гг. Для анализа временной изменчивости климатических величин были рассчитаны их базовые характеристики: средняя (климатические нормы 1966–2019 гг. и 1981–2010 гг.), среднее квадратическое отклонение (СКО) для температуры и коэффициент вариации (V) для суммы осадков, аномалии величин (в расчетах использована базовая норма периода 1981–2010 гг.). Оценка региональных изменений климата получена с применением тренд-анализа. Угловой коэффициент наклона линии тренда (КНЛТ) характеризуют скорость изменения величины, а положительный знак коэффициента указывает на рост (повышение) значения величины, отрицательный – на его снижение (уменьшение). Величиной коэффициента детерминации R<sup>2</sup> оценивался вклад линейного тренда в общую изменчивость показателя и ее статистическая значимость (Переведенцев и др., 2011).

Климат геопарка умеренно континентальный с теплым летом и достаточно холодной зимой. Средняя годовая температура воздуха данного региона составляет 2,1 °С для периода 1966–2019 гг. Наибольшая температура воздуха наблюдается в июле (17,7 °С), наименьшая – в январе (-14,2 °С) (табл. 1).

Климат геопарка умеренно континентальный с теплым летом и достаточно холодной зимой. Средняя годовая температура воздуха данного региона составляет 2,1 °С для периода 1966–2019 гг. Наибольшая температура воздуха наблюдается в июле (17,7 °С), наименьшая – в январе (-14,2 °С) (табл. 1).

Таблица 1. Среднемесячные, среднегодовые температуры воздуха и суммы атмосферных осадков и показатели их изменчивости

Период	Показатель	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1966 – 2019	t, °С	-14,2	-12,9	-5,7	3,5	11,3	15,9	17,7	15,3	9,6	2,2	-5,6	-11,6	2,1
	СКО	4,0	3,4	2,5	2,7	2,0	2,1	1,9	1,9	1,6	2,4	3,1	4,0	1,0
	КНЛТ t	0,69	0,54	0,37	0,04	0,29	0,27	0,22	0,37	0,22	0,53	0,03	0,37	0,33
1981 – 2010	t, °С	-13,1	-12,5	-5,6	3,4	11,0	16,4	18,0	15,3	9,6	3,0	-6,0	-11,5	2,3
	СКО	3,5	3,3	2,4	2,8	2,1	2,1	1,9	1,8	1,4	1,8	3,5	3,7	0,9
	КНЛТ t	-0,34	-0,17	1,01	-0,06	0,83	-0,25	0,13	0,52	0,50	0,64	1,09	-0,49	0,28
1966 – 2019	R, мм	24,3	20,9	21,7	28,6	48,5	62,9	77,5	65,4	53,7	51,5	35,7	28,2	518,9
	V	56,9	68,1	64,6	60,2	58,3	56,9	54,6	41,4	54,0	48,8	50,7	52,3	19,8
	КНЛТ R	0,34	0,32	1,39	0,94	4,22	0,09	0,09	1,07	0,30	0,72	0,87	1,53	11,88
1981 – 2010	R, мм	27,2	22,6	21,5	29,2	51,8	62,8	69,2	69,2	58,5	48,9	38,8	30,6	530,2
	V	52,7	54,8	72,5	68,1	62,7	62,7	66,0	40,5	54,5	52,7	54,1	54,7	20,3
	КНЛТ R	1,69	2,75	4,71	-1,83	8,80	1,50	10,54	-5,26	-12,09	-5,19	2,09	1,78	-11,59

Примечание. КНЛТ t (°С/10 лет), КНЛТ R (мм/10 лет). Цветом выделены статистически значимые тренды.

Анализ СКО средних месячных температур показывает, что самыми устойчивыми месяцами являются сентябрь, июль, август. Наибольший временной разброс температур характерен для января и декабря.

Временной анализ выявил, что практически во всех месяцах отмечается рост температуры воздуха (за исключением мая и ноября). Статистически значимые тренды обнаружены в январе, октябре и за год, а также в марте периода 1981–2010 гг. (табл. 1).

Повышение температуры воздуха также под-

тверждает многолетний ход ее аномалий (рис. 2). Их распределение показывает, что с начала 2000-х гг. увеличивается частота теплых годов. Наибольшие положительные аномалии температуры выявлены в 1995 г. (1,7 °С), что хорошо согласуется с обработанными космоснимками температуры поверхности Земли территории геопарка (рис. 3), и 2008 г. (1,5 °С). Самые крупные отрицательные аномалии температуры наблюдались в 1969 и 1941 гг. (-3,6 °С и -3,4 °С соответственно).

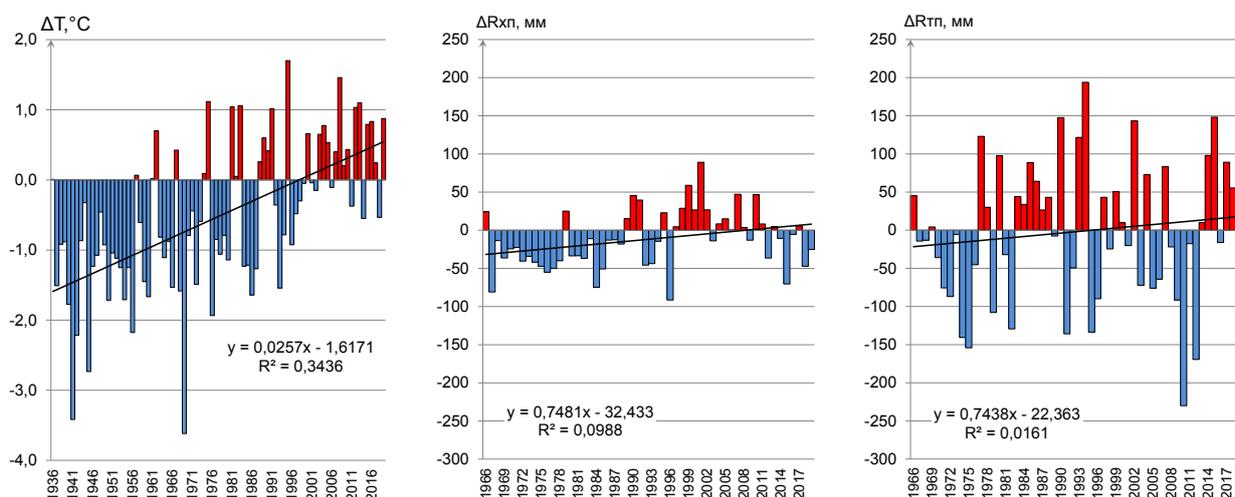


Рис. 2. Многолетний ход аномалий средней годовой температуры воздуха ( $\Delta T$ ), суммы осадков холодного периода ( $\Delta R_{xp}$ ) и суммы осадков теплого периода ( $\Delta R_{tp}$ )

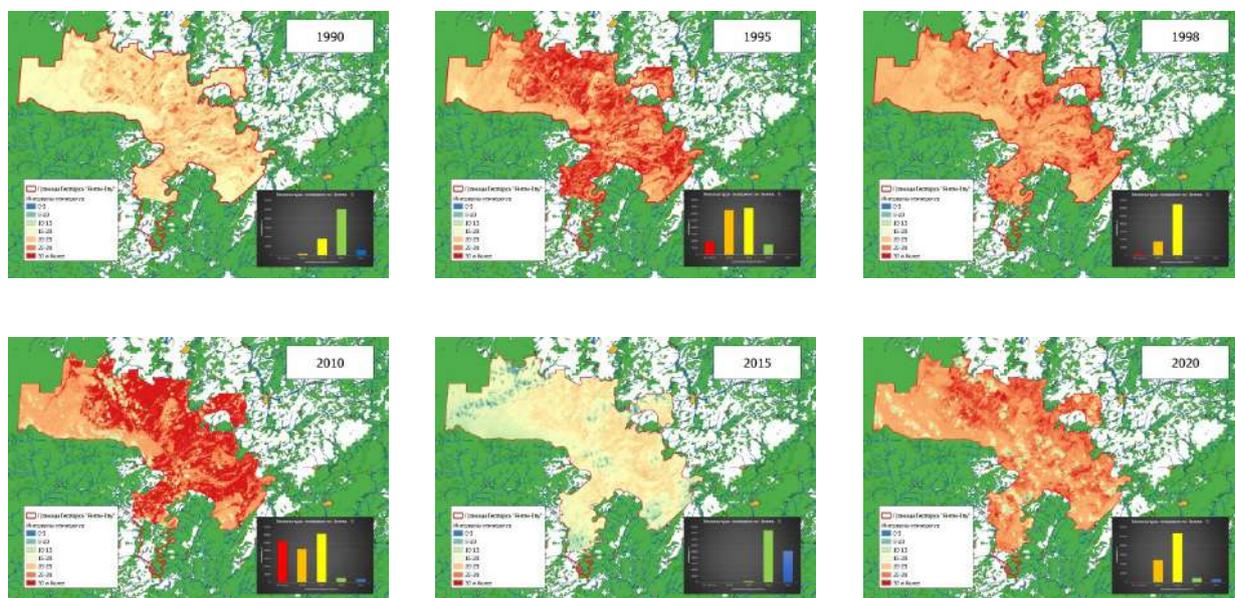


Рис. 3. Картограммы температуры поверхности Земли территории геопарка «Янган-Тау»

На территории геопарка «Янган-тау» с момента его организации проводятся микроклиматические исследования по данным наблюдений заложённых дата-логгеров DT-171 и космических спектральных снимков (Landsat, Sentinel). Ретроспективный анализ температур поверхности Земли в пределах геопарка «Янган-Тау» проводился с использованием модуля Semi-Automatic Classification Plugin (Q-Gis). Результаты исследования демонстрируют увеличение площадей с более высокими температурными интервалами (более 25 °C) в августе. В качестве примера на рис. 3 показано распределение температур поверхности геопарка за отдельные годы.

Годовая сумма атмосферных осадков составляет почти 520 мм (для периода 1966–2019 гг.). В холодный период выпадает 136 мм, в тёплый – 388 мм. Наибольшей временной вариацией характеризуется сумма осадков февраля и марта (табл. 1).

Тренд-анализ показывает, что годовая сумма осадков имеет тенденцию к увеличению в период 1966–2019 гг. (12 мм/10 лет). В то же время, рассматривая период базовой нормы 1981–2010 гг., обнаруживается противоположный тренд – уменьшение суммы осадков со скоростью -11,6 мм/10 лет. В целом наибольший вклад в данную тенденцию производит КНЛТ суммы осадков тёплого периода (-24,6 мм/10 лет). Сумма осадков холодного периода имеет положительные статистически значимые тренды (21,6 мм/10 лет). Многолетний ход аномалий сезонных сумм осадков проиллюстрирован на рис. 2.

Выявленные тенденции основных климатических показателей совокупно влияют на изменения гидротермических условий территории геопарка. Одним из широко применяемых показателей является индекс засушливости Д.А. Педя (Переведенцев и др., 2011). Многолетняя

динамика индекса, рассчитанная по данным мст. Дуван, имеет тенденцию к увеличению (0,26 ед./10 лет). Таким образом, это свидетельствует о том, что летние условия смещаются в сторону большей засушливости.

Изменения климатических условий проявляются повсеместно на территории Республики Башкортостан (Галимова, 2020; Galimova, Silantyev, 2019). Поэтому в настоящее время остро встает вопрос об уязвимости и адаптации к климатическим изменениям уникальных природных комплексов геопарка «Янган-Тау». Выявленные тренды климатических величин температурно-влажностного режима являются одними из последствий глобального потепления. При устойчивом развитии данного процесса территория геопарка может быть подвержена весьма неблагоприятным природно-климатическим явлениям: учащение волн тепла и чрезвычайных пожароопасных периодов, развитие атмосферной и почвенной засух при дальнейшей аридизации, усиление воздушной эрозии летом и водной эрозии в весеннее период и т.п. Данный вопрос является актуальным, поскольку, во-первых, требует дальнейшего изучения последствий изменений регионального климата на функционирование и адаптацию природных комплексов геопарка «Янган-Тау»; во-вторых, климатическая изученность данной территории играет важную роль в республиканских исследованиях процессов декарбонизации и секвестрационной

политики, т.к. территория геопарка хорошо подходит в качестве опытного участка.

### Литература

1. Галимова Р.Г. Анализ изменений температурно-влажностного режима на территории Республики Башкортостан в современный период // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30. № 1. С. 83–93.
2. Переведенцев Ю.П., Верещагин М.А., Шанталинский К.М., Наумов Э.П., Хабутдинов Ю.Г. Изменения климатических условий и ресурсов Среднего Поволжья: учебное пособие по региональной климатологии. Казань: Центр Интех, 2011. 296 с.
3. Bogdan E., Belan L., Akbashev A. Demonstration of climate change in the Yangan-Tau geopark (Russia) // Abstracts book. The 6th Asia Pacific Geoparks Network Symposium. Lombok – Indonesia. 2019. P. 62.
4. Galimova R., Silantyev K. The analysis of the long-term dynamic of the amount of atmospheric precipitation on the territory of the republic of Bashkortostan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: VII International Scientific Practical Conference «Modern problems of reservoirs and their catchments». 2019. V. 321. С. 012020. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/321/1/012020>.

УДК 551.583

## СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН И ЕГО СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Р.Г. Камалова, А.И. Исмагилова

*Башкирский государственный университет, Уфа, Россия, galim-rita@yandex.ru*

В статье проанализирована изменчивость характеристик снежного покрова на территории Республики Башкортостан в современный период. Анализ показал, что высота и запасы воды снежного покрова увеличиваются, продолжительность залегания несколько сокращается. Выявлены региональные особенности в трендах характеристик снежного покрова.

*Ключевые слова: снежный покров; изменение климата; тренд; Башкортостан.*

The article analyzes the variability of the characteristics of the snow cover on the territory of the Republic of Bashkortostan in the modern period. The analysis showed that the height and water reserves of the snow cover are increasing, the duration of occurrence is somewhat reduced. Revealed regional features in the trends of characteristics of the snow cover.

*Keywords: snow cover; climate change; trend; Bashkortostan.*

Современные климатические изменения определяются набором изменений отдельных климатических величин и учитываются в качестве фактора, влияющего на природную среду, природные и социально-экономические процессы. Данные исследования отражены в «Оценочных докладах» Межправительственной группы экспертов по изменению климата (<https://www.ipcc.ch/>) и Росгидромета (<https://cc.voeikovmgo.ru/>).

Снежный покров (СП) – это хороший «индикатор» глобального потепления на региональном уровне,

поскольку является продуктом взаимодействия термических условий и влажностных характеристик атмосферы в зимний период. При изменениях данного взаимодействия напрямую будет зависеть режим СП и его пространственно-временная изменчивость.

Территорией исследования является Республики Башкортостан (РБ), которая имеет сложное природно-орографическое строение. По общности рельефа выделяют равнинное Предуралье, Южный Урал и холмисто-увалистое Зауралье. В силу этого широтная

климатическая зональность в пределах Южного Урала нарушается. В этой области СП устанавливается раньше и сходит гораздо позже, чем в других регионах РБ.

Для характеристик СП на территории РБ использованы его основные характеристики: высота; снегозапасы; даты образования и разрушения устойчивого снежного покрова; продолжительность дней со снежным покровом. Для изучения современных изменений были проанализированы имеющиеся ряды данных многолетних наблюдений 23 метеостанций: высоты СП за период 1958–2017 гг. (59 лет); остальных характеристик за период 1973–2017 гг. (45 лет).

В качестве базовых статистических характеристик вычислены средние (климатические нормы), среднеквадратическое отклонение (СКО); выявлены максимальные и минимальные значения, для дат – самые ранние и поздние сроки. Оценка региональных изменений климата получена с применением тренд-анализа. С помощью углового коэффициента наклона линии тренда (КНЛТ) характеризовалась скорость изменения величины, ее рост (повышение) или снижение (уменьшение) (табл. 1).

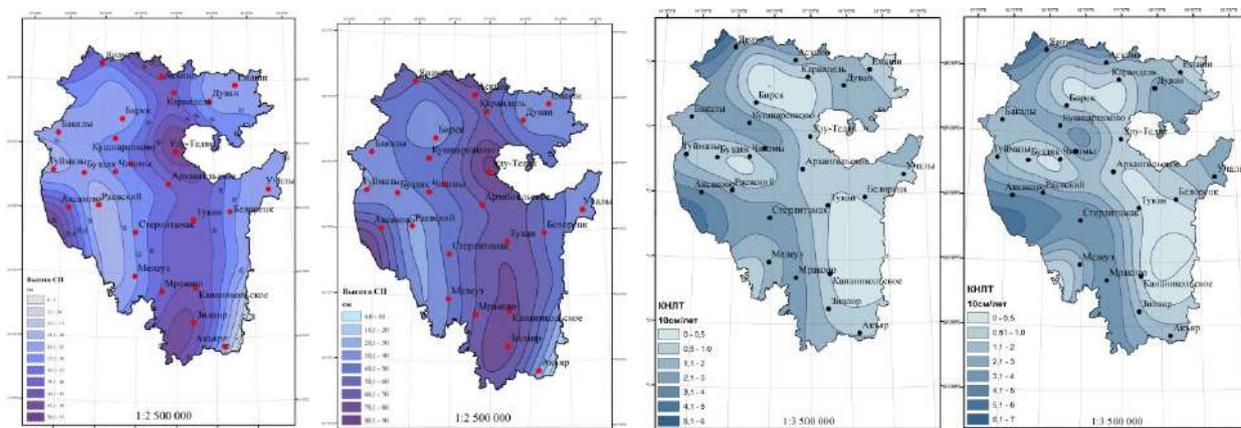
Величиной коэффициента детерминации  $R^2$  оценивался вклад линейного тренда в общую изменчивость показателя. Тенденция в 45-летнем периоде считалась статистически значимой при  $p < 0,05$  при величине  $R^2 > 0,09$ ; в 59-летнем периоде – при величине  $R^2 > 0,08$ .

Территориальное распределение средней высоты СП в Республике Башкортостан показано на рис. 1 а. Высота СП увеличивается в восточном направлении к Уральским хребтам, далее в Зауралье снова снижается. Наибольшая средняя высота СП отмечается в пределах Южного Урала (от 36–45 см в пределах Зилаирского до 45–49 см в северной части). Кроме этого, увеличение данного показателя наблюдается в пределах Предуралья на Уфимском плато (36–41 см) и на Бугульминско-Белебеевской возвышенности (35 см). Но при этом в равнинном Приуралье СП имеет более равномерный характер залегания (25–30 см) с наименьшим значением 16 см на мст. Раевский, находящейся на подветренной стороне этой возвышенности. Зауралье также характеризуется низкой мощностью СП (от 17 см на юге до 22 см на севере региона).

Таблица 1. Статистические характеристики показателей снежного покрова, осредненные для территории Республики Башкортостан

Показатель	Среднее значение	СКО	Максимальная / Самая ранняя дата	Минимальная / Самая поздняя дата	КНЛТ
Средняя высота (см)	31	7	48 (2000–2001)	16 (1979–1980, 2008–2009)	1,3 см/10 лет
Максимальная высота (см)	48	10	79 (2000–2001)	31 (1966–1967, 2008–2009)	1,8 см/10 лет
Запасы воды (мм)	78	19	129 (2000–2001)	39 (1979–1980)	1,0 мм/10 лет
Дата образования	12.11	9	24.10	9.12	1,6 дни/10 лет
Дата разрушения	12.04	6	30.03	23.04	0,8 дни/10 лет
Продолжительность (дни)	150	11	170 (1978–1979)	114 (2008–2009)	-0,6 дни/10 лет

Максимальная высота СП характеризуется аналогичным распределением на территории республики. Наибольшие значения выявлены также на Южном Урале (60–80 см). В Предуралье она составляет 35–70 см, в Зауралье – около 30–50 см (рис. 1б).



а. Средняя высота      б. Максимальная за зиму высота      в. КНЛТ средней высоты      г. КНЛТ максимальной за зиму высоты

Рис. 1. Распределение средней, максимальной высоты СП на территории РБ и их КНЛТ за период 1958–2017 гг.

Распределение КНЛТ средней высоты СП за период 1958–2017 гг. имеет следующую закономерность (рис. 1в): в западных районах РБ более высокие значения скорости роста, чем в восточных. КНЛТ средней высоты СП по 12 метеостанциям статистически значимы: наибольшее значение отмечается на крайнем северо-западе республики (3,1 см/10 лет), наименьшее – на Уфимском плато (0,1 см/10 лет). КНЛТ максимальной высоты снежного покрова по 11 метеостанциям статистически значимы (рис. 1г); при этом самые высокие значения отмечаются на юге Предуралья (3,0–4,0 см/10 лет). Выявленные закономерности изменения средней и максимальной высоты СП свидетельствуют об ее увеличении на территории РБ. 60% метеостанций обладают статистически значимыми трендами.

В качестве показателя возмущённости и неоднородности территориального распределения высоты СП во времени использовался индекс аномальности Багрова (Переведенцев, Батршина, 2011) за период 1958–2017 гг. Результаты расчетов показали, что максимальный коэффициент аномальности средней высоты СП составил 1,8 в центральной части РБ (мст. Архангельский и Уфа-Дёма). Минимальное значение индекса обнаружено на юге Зауралья (1,3). Для максимальной высоты СП наибольший коэффициент аномальности выявлен на крайней западной и южной метеостанциях Предуралья (1,7), наименьший – в его северной половине (1,4 на мст. Бирск). Таким образом, аномальность залегания в многолетнем периоде больше у максимальной высоты СП, т.е. имеют большую временную изменчивость.

Запасы воды в СП территориально распределены аналогично его высоте. Одни из наиболее высоких показателей снеготолщин наблюдаются в пределах Южного Урала: от 98 до 137 мм. Так же значительные показатели отмечаются на Уфимском плато (141 мм) и на Бугульминско-Белебеевской возвышенности (107 мм). Наименьшие запасы воды в снеге обнаружены на мст. Раевский (47 мм). Как правило, Зауралье характеризуется также низкими значениями этого показателя (48–51 мм).

Тренд-анализ показывает, что наблюдается тенден-

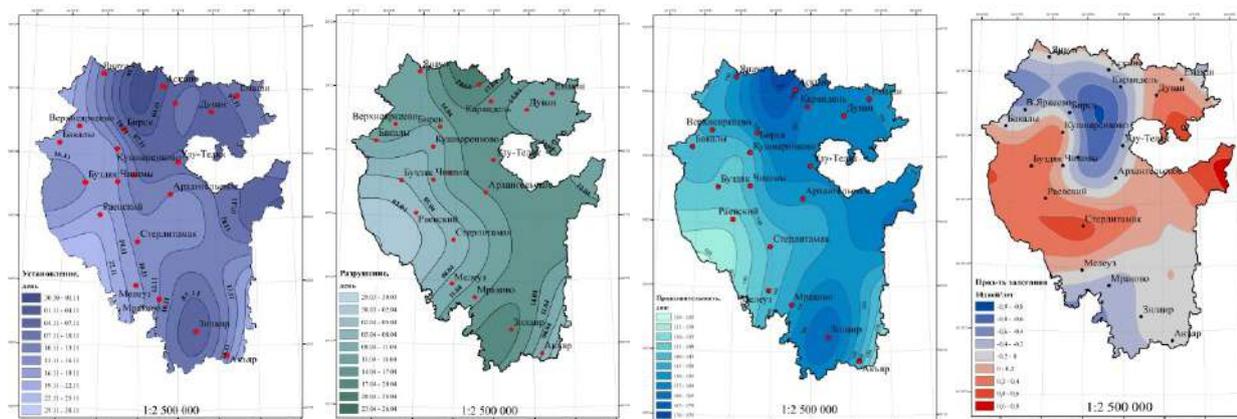
ция к увеличению запасов воды в СП, составляющая 1,0 мм/10 лет. КНЛТ запасов воды в СП на 10 метеостанциях статистически значимы. Наибольшее увеличение наблюдается в центральной и западной частях Предуралья (0,6–0,7 мм/10 лет). Наибольшее отрицательное значение выявлено на западных наветренных склонах Южного Урала (-1,2 мм/10 лет).

В РБ устойчивый СП ранее всего устанавливается в Предуралье, позднее – в горной части (рис. 2 а). Средней датой образования СП в РБ считается 12 ноября. Самые ранние даты установления характерны для Бугульминско-Белебеевской возвышенности (3 ноября), Зилаирского плато (5 ноября), Юрюзано-Айского понижения (6 ноября). Самое позднее установление СП приходится на 18–20 ноября в крайне западных районах Предуралья.

Осреднённое значение КНЛТ даты образования СП для РБ составляет 1,6 дня/10 лет, т.е. означает рост линии тренда, т.е. более позднее установление устойчивого СП. Наибольшая скорость смещения даты установления СП отмечается на мст. Уфа-Дема (4,7 дня/10 лет), а также на западных склонах Южного Урала (3,5–3,7 дня /10 лет), юге Зауралья (3,3 дня /10 лет), Уфимском плато (2,9–3,4 дня /10 лет). Кроме этого, выявлены отрицательные КНЛТ даты установления СП на юге Предуралья (-1,2...-2,1 дня /10 лет). Кроме этого замечено, что даты образования имеют наибольший временной разброс по сравнению с датами разрушения СП (табл. 1).

Разрушение устойчивого СП происходит в направлении с юго-запада на северо-восток республики (рис. 2 б). В среднем для РБ это происходит 12 апреля. Самое раннее разрушение СП происходит на юге и западе Предуралья (3–6 апреля) и юге Зауралья (8 апреля).

Для разрушения устойчивого СП в РБ осредненный КНЛТ даты положительный и составляет 0,8 дня /10 лет, что смещение дат на более поздние сроки. Отрицательные значения КНЛТ (смещение на более ранние сроки) выявлены всего на пяти метеостанциях: Верхнеяркеево (-1,5 дня /10 лет), Караидель (-1,2 дня /10 лет), Бирск (-0,1 дня /10 лет), Зилаир (-0,04 дня /10 лет), Архангельское (-0,001 дня /10 лет). На остальных метеостанциях РБ данный коэффициент положительный.



а. Средняя дата образования

б. Средняя дата разрушения

в. Продолжительность залегания

г. КНЛТ продолжительности залегания

Рис. 2. Распределение средней, максимальной высоты СП на территории РБ и их КНЛТ за период 1958–2017 гг.

Для анализируемого периода средняя продолжительность залегания СП составляет 150 дней (табл. 1, рис. 2в). Наименьшая средняя продолжительность залегания СП составляет 133 дня (мст. Раевский), наибольшая – 167 дней (мст. Аскино). Самое длительное залегание наблюдалось зимой 1978–1979 гг., короткое – 2008–2009 гг. В последнем случае выявлена крупная отрицательная аномалия по данной характеристике: залегание СП длилось 114 дней. Установлено, что 71 % случаев приходится на годы с продолжительностью залегания СП в пределах нормы, 15 % – больше нормы, 13 % – ниже нормы (Галимова, Исмагилова, 2020).

В центральной части Предуралья и на Южном Урале происходит увеличение продолжительности залегания СП, в северной и южной частях Предуралья – сокращение (рис. 2 г). В целом по республике продолжительность залегания СП имеет тенденцию к незначительному сокращению (-0,6 дня/10 лет).

Изменения климатических условий проявляются повсеместно на территории Республики Башкортостан (Galimova, 2020). Одно из таких проявлений является изменение характеристик снежного покрова.

В ходе представленного исследования обнаружено, что:

1) высота и запасы воды в СП увеличиваются, что хорошо согласовывается с тенденцией к увеличению зимних осадков в республике (Galimova, Silantyev, 2019);

2) даты образования и разрушения СП смещаются на более поздние сроки;

3) продолжительность залегания незначительно сокращается.

Таким образом, можно констатировать, что зимние условия на территории Республики Башкортостан меняются согласно закономерностям глобального потепления климата.

### Литература

1. Галимова Р.Г. Климат Республики Башкортостан: учебное пособие. Уфа: РИЦ БашГУ, 2017. 96 с.
2. Галимова Р.Г., Исмагилова А.И. Анализ изменчивости дат установления, схода и продолжительности залегания снежного покрова на территории Республики Башкортостан // Астраханский вестник экологического образования. 2020. № № 3 (57).
3. Переведенцев Ю.П., Батршина С.Ф. Динамика снежного покрова на территории Республики Татарстан // Снежный покров и снежные лавины. 2011. № 1 (113). С. 53–58.
4. Galimova R.G. Variability of the snow cover and its characteristics on the territory of the Republic of Bashkortostan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. P. 012027.
5. Galimova R., Silantyev K. The analysis of the long-term dynamic of the amount of atmospheric precipitation on the territory of the republic of Bashkortostan // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: VII International Scientific Practical Conference «Modern problems of reservoirs and their catchments». 2019. V. 321. С. 012020. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/321/1/012020>.

УДК 551.515.6

## ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ НАД ЮГОМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА CLOUDSAT

М.С. Картавых<sup>1,3</sup>, К.Н. Пустовалов<sup>1,2</sup>, Т.С. Кошикова<sup>2</sup>, П.М. Нагорский<sup>2</sup>, М.В. Оглезнева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>3</sup>Сибирский центр ФГБУ «НИЦ «Планета», Новосибирск, Россия

*ms.kartavykh@gmail.com, const.pv@yandex.ru, tkoshikova@gmail.com, npm\_sta@mail.ru, oglezneva.m@yandex.ru*

Исследования поддержаны грантом Президента РФ (МК-489.2020.5).

В статье приведены результаты исследования структуры мезомасштабных конвективных систем над югом Западной Сибири по данным радара CPR спутника CloudSat, в частности рассматриваются вертикальные профили радиолокационной отражаемости и водности МКС. Также представлены таблицы со статистическими характеристиками изменчивости исследуемых величин внутри МКС.

*Ключевые слова: мезомасштабные конвективные системы, Западная Сибирь, спутник CloudSat, радар CPR*

The article presents the results of the study of the structure of mesoscale convective systems over the south of Western Siberia according to the data of the CPR radar of the CloudSat satellite, in particular, the vertical profiles of the radar reflectivity and water content of the ISS are considered. Tables with statistical characteristics of the variability of the studied values within the ISS are also presented.

*Keywords: mesoscale convective systems, Western Siberia, CloudSat satellite, CPR radar*

Известно, что с кучево-дождевыми (грозовыми) облаками связаны многие неблагоприятные и опасные метеорологические явления: смерч, гроза, шквал, микропорыв, град, интенсивный ливневый дождь и снег и др.

Наиболее опасными проявлениями кучево-дождевой облачности являются мезомасштабные конвективные системы и особенно их специфическая разновидность мезомасштабные конвективные комплексы (МКС) (Maddox, 1980). В отличие от «классических» кучево-дождевых облаков МКС имеют на порядок большие размеры и время существования (Вельтищев, 2006). Как следствие, с прохождением МКС часто связан экономический ущерб и человеческие жертвы. В связи с этим детальное исследование МКС видится весьма актуальным.

В России повышенная повторяемость МКС отмечается на территории юга Западной Сибири (Жукова и др., 2019). Их исследованию на сегодняшний день уделено недостаточное внимание. В частности, нет полного понимания вертикальной структуры МКС над данной территорией.

Целью работы является анализ вертикальной структуры мезомасштабных конвективных систем над югом западной Сибири по данным спутника CloudSat.

Для исследования были использованы следующие данные:

RGB-изображения по данным спектрорадиометров MODIS и VIIRS (EOSDIS Worldview).

Продукты второго уровня обработки на основе данных радара CPR (спутник CloudSat) в формате HDF (CloudSat Data Processing Center).

Для исследования были отобраны случаи прохождения МКС, совпадающие с пролётами спутника CloudSat, на юге Западной Сибири за период 2009–2019 гг. Отбор случаев проводился с использованием

данных портала EOSDIS Worldview. Для отобранных случаев МКС с сервера CloudSat Data Processing Center были получены данные продуктов второго уровня обработки, получаемые на основе измерений CPR.

Далее с помощью программной среды MATLAB для каждого из рассмотренных продуктов были написаны скрипты для автоматизированного импорта и визуализации данных.

В ходе обработки данных были построены тематические изображения: спутниковые снимки МКС по данным спектрорадиометров MODIS и VIIRS с нанесёнными траекториями пролётов спутника CloudSat, вертикальные профили радиолокационной отражаемости и водности в пределах отобранных случаев МКС. Примеры тематических изображений приведены на (рис. 1).

Также были рассчитаны статистические характеристики изменчивости исследуемых величин внутри МКС. Всего было отобрано и проанализировано 15 случаев МКС.

На (рис. 1) видно, что в МКС отмечается «слияние» радиоэха от множества входящих в него конвективных (грозовых) ячеек. При этом образуется одно огромное радиоэхо с горизонтальной протяжённостью ~50 км и более. Слияние происходит главным образом в верхней половине МКС, в то время как в нижней половине, наоборот, фиксируются отдельные «отроги» радиоэха, связанные с нисходящими потоками и зонами ливневых осадков из отдельных конвективных (грозовых) ячеек, входящих в состав МКС.

В (табл. 1, 2) приведены средние значения статистических характеристик изменчивости радиолокационной отражаемости и влагосодержания в пределах рассмотренных случаев МКС соответственно.

Таблица 1. Статистические характеристики изменчивости радиолокационной отражаемости в пределах МКС на юге Западной Сибири.

Радиолокационная отражаемость (Z), дБ										
Среднее	Медиана	СКО	ИКР	Мин	Макс	P5	P25	P50	P75	P95
-2,6	1,9	14,6	22,8	-40,0	17,3	-30,2	-13,2	3,0	9,6	13,9

Примечание. СКО – стандартное отклонение, ИКР – интерквантильный размах, Мин – абсолютный минимум, Макс – абсолютный максимум, P5, P25, P50, P75, P95 – 5-, 25-, 50-, 75- и 95-процентили соответственно.

Таблица 2. Статистические характеристики изменчивости водности в пределах МКС на юге Западной Сибири.

Влагосодержание (Q), г/м <sup>3</sup>										
Среднее	Медиана	СКО	ИКР	Мин	Макс	P5	P25	P50	P75	P95
0,51	0,45	0,36	0,57	0,0	1,62	0,03	0,21	0,5	0,78	1,14

Примечание. СКО – стандартное отклонение, ИКР – интерквантильный размах, Мин – абсолютный минимум, Макс – абсолютный максимум, P5, P25, P50, P75, P95 – 5-, 25-, 50-, 75- и 95-процентили соответственно.

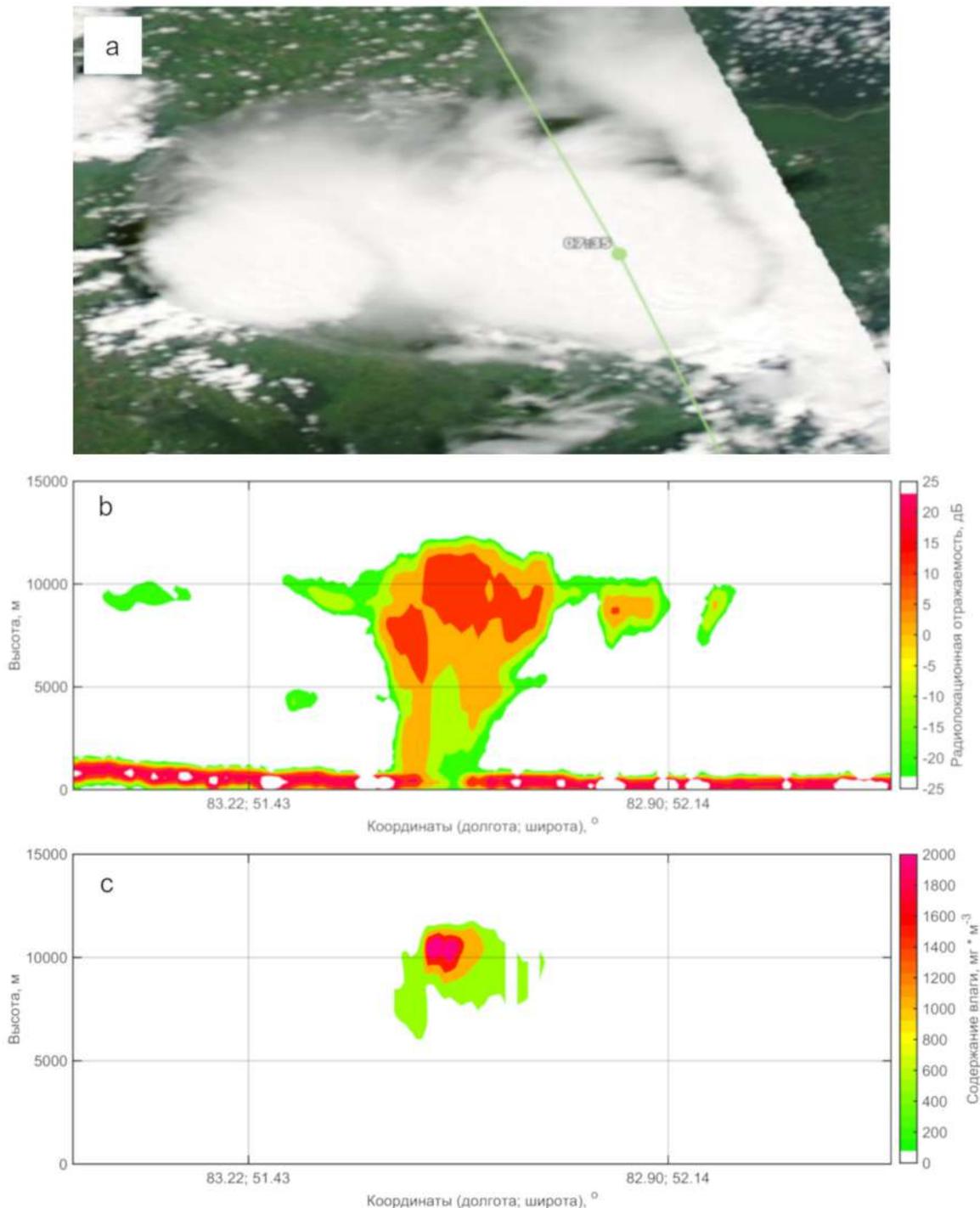


Рис. 1. RGB-изображение МКС (а), профиль радиолокационной отражаемости (b) и профиль водности (с) за 14.07.2018 г.

Анализ полученных результатов показал следующее.

Средние значения радиолокационной отражаемости ( $Z$ ) в МКС составили  $-4,4 \div -0,1$  дБ, максимальное значение составило 22,1 дБ. Средние значения водности ( $Q$ ) в МКС составили  $0,18 \div 1,01$  г/м<sup>3</sup>, максимальное значение составило 3,2 г/м<sup>3</sup>.

Высота верхней границы, радиолокационная отражаемость и водность МКС значительно превосходят аналогичные параметры, характерные для одиночных кучево-дождевых облаков.

Основное «тело» МКС, представляющее собой зону со значениями  $Z$  и  $Q$  большими 25-процентиля ( $Z > -15$  дБ,  $Q > 0,2$  г/м<sup>3</sup>), расположено на высотах  $5,6 \div 7,7$  км, простирается до высоты  $\sim 11$  км и имеет среднюю протяженность  $\sim 85$  км. Нижняя граница этой зоны по значениям радиолокационной отражаемости всегда достигает подстилающей поверхности, а по влагосодержанию находилась на высоте  $\sim 4,5$  км.

Зона МКС со значениями  $Z$  и  $Q$  большими 50-процентиля ( $Z > 3$  дБ,  $Q > 0,45$  г/м<sup>3</sup>), расположена в сред-

нем на высотах 5,6÷8 км, высота её верхней границы составляет ~10,7 км, а протяженность – 50÷80 км. Нижняя граница данной зоны по данным Z в большинстве случаев достигает земли, что является показателем наличия в данном месте ливневых осадков, а по данным Q располагалась на высоте ~5,5 км.

Зона МКК с наиболее высокими (> 75-перцентиля) значениями Z и Q ( $Z > 10$  дБ,  $Q > 0,7$  г/м<sup>3</sup>) расположена в среднем на высотах 6,7÷8 км, её верхняя граница находится на высоте ~10,2 км, а средняя протяженность составляет 40÷50 км. Нижняя граница данной зоны находилась на высотах 3÷6 км.

Также, сравнение результатов с (Степаненко, 1966; Брылёв и др., 1986; Хромов и др., 2001) показало, что полученные значения влажности, в целом, мало отличаются, а значения радиолокационной отражаемости имеют более низкие значения, что объясняется, предположительно, более сильным затуханием радиоизлучения, принимаемого спутниковыми радарами по сравнению с наземными радиолокаторами, по которым были получены значения в данной литературе.

Полученные оценки могут быть применены при создании численных моделей конвективной облачности, а также для создания новых методов обнаружения МКК и оценки их характеристик с помощью искусственных спутников Земли.

УДК 551.594

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕВОЗМУЩЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

Л.В. Кашлева<sup>1</sup>, Ю.С. Мацуцина<sup>1</sup>, Ю.П. Михайловский<sup>2</sup>, Б.Г. Зайнетдинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, [kashleval@yandex.ru](mailto:kashleval@yandex.ru)

<sup>2</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия,

В представленной работе рассчитываются вертикальные профили электрических параметров атмосферы в условиях «хорошей погоды» и моделируется изменение электрических параметров с высотой в результате формирования облачного слоя неконвективных облаков в пограничном слое атмосферы. Показано, что даже тонкий слой слоистообразных облаков нижнего яруса приводит к значительным изменениям плотности тока проводимости атмосферы.

*Ключевые слова:* Глобальная Атмосферная Электрическая цепь, атмосферное электричество, унитарная вариация, хорошая погода, модель

In the presented work, the vertical profiles of the electrical parameters of the atmosphere are calculated in “good weather” conditions and the change in the electrical parameters with height is simulated as a result of the formation of a cloud layer of non-convective clouds in the boundary layer of the atmosphere. It is shown that even a thin layer of stratus clouds of the lower tier leads to significant changes in the current density of the conduction of the atmosphere.

*Keywords:* Global atmospheric electrical circuit, atmospheric electricity, diurnal variation, fair weather, model

### Введение

В соответствии с современными представлениями, электрическое поле атмосферы может быть представлено Глобальной Атмосферно-Электрической цепью (ГЭЦ). Эта модель включает в себя все многообразие погодных и атмосферно-электрических явлений. При самом общем виде в атмосфере могут быть выделены

### Литература

1. Брылёв Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога Г.Л. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 216 с.
2. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы. М.: МГУ, 2006. 101 с.
3. Жукова В.А., Кошикова Т.С., Кужевская И.В. Оценка параметров мезомасштабных конвективных комплексов на основе спутниковых и аэрологических данных (Западная Сибирь) // Геосферные исследования. 2019. № 2. С. 86–97.
4. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии (Радиометеорология). Л.: Гидрометеиздат, 1966. 350 с.
5. Хромов С.П., Петросянец М.А. Метеорология и климатология: Учебник. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2001. 272 с.
6. CloudSat Data Processing Center [Электронный ресурс]. – URL: <ftp1.cloudsat.cira.colostate.edu> (Дата обращения: 21.02.2021).
7. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov> (Дата обращения: 02.02.2021).
8. Maddox R.A. 1980. Mesoscale convective complexes // Bull. Am. Meteorol. Soc. V. 61. pp. 1374–1387.

участки, охваченные грозовой деятельностью, и участки вне грозовой деятельности – участки в невозмущенной атмосфере. В представленной работе рассмотрены методы расчета атмосферно-электрических параметров в условиях «хорошей погоды» и их изменение при формировании слоя слоистообразных или волнистообразных облаков в пограничном слое атмосферы.

## 1. Расчет вертикальных профилей электрических параметров атмосферы в условиях «хорошей погоды».

Для исследования электрической структуры атмосферы в условиях «хорошей погоды» использована одномерная электростатическая модель, в которой рассчитываются электрические параметры тропосферы (Кашлева, Баранова, Михайловский, 2018).

В основе модели - теория ГЭЦ. В соответствии с этой теорией изменение вертикальной составляющей напряженности атмосферного электрического поля с высотой является следствием существования положительного объемного заряда в атмосфере.

При разработке модели были приняты следующие основные допущения:

1. Электрическое поле атмосферы является результатом разности потенциалов земной поверхности и ионосферы, но в тропосфере сосредоточен объемный заряд, частично компенсирующий заряд земной поверхности. Напряженность электрического поля атмосферы у Земли ( $E_0$ ) определяется плотностью тока проводимости атмосферы и суммарной проводимостью атмосферы.

2. В анализе был применён принцип квазистатичности, так как в атмосфере время релаксации электростатических процессов меньше 1 часа.

3. Исходная модель является одномерной, так как в условиях «хорошей погоды» вертикальный градиент напряженности электрического поля значительно больше горизонтального градиента.

4. Перенос зарядов в тропосфере целиком обусловлен проводимостью атмосферного воздуха, что позволяет использовать закон Ома для вертикального столба атмосферы.

5. Напряженность электрического поля атмосферы у Земли ( $E_0$ ) определяется плотностью тока проводимости атмосферы и суммарной проводимостью атмосферы.

В качестве исходных данных использованы: напряженность электрического поля атмосферы у земной поверхности и типичный суточный ход полярных проводимостей атмосферы по данным измерений в Воейково, а также данные вертикального профиля температуры воздуха и давления стандартной атмосферы. Проведенные расчеты согласуются с имеющимися данными, представленные в литературе. Это позволяет использовать представленную модель для построения профилей электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды».

## 2. Моделирование процессов переноса заряда в невозмущенной тропосфере.

В результате формирования слоя слоистообразных или волнистообразных облаков в пограничном слое атмосферы происходит перестройка электрической структуры тропосферы. Для анализа процесса трансформации электрических характеристик была разработана модель формирования электрических структуры облачной тропосферы вне зон грозовой деятельности. Основной идеей новой модели электрической структуры атмосферы было внесение слоя с проводимостью атмосферы, соот-

ветствующей слою примесей и облачности, для определения влияния данного слоя на распределение электрических параметров атмосферы с высотой и их изменение во времени. Модель динамическая. Шаг по высоте 100 м. Шаг по времени 1 минута. В атмосфере течет ток проводимости атмосферы, плотность которого определяется электрическим полем атмосферы, концентрацией и подвижностью ионов в каждом слое. В качестве исходных данных были использованы значения, полученные для атмосферы в условиях «хорошей погоды».

Расчет проводился в три этапа. На первом этапе были рассчитаны профили основных электрических параметров атмосферы в условиях «хорошей погоды» (условиях стационарного состояния). Были получены вертикальные профили следующих характеристик: напряженность электрического поля ( $E_z$ ) и проводимость ( $\lambda_z$ ) атмосферы, концентрации ( $n^+$ ,  $n^-$ ) и подвижности ( $k^+$ ,  $k^-$ ) положительных и отрицательных ионов, плотность объемного заряда атмосферы ( $\rho_z$ ) и ток проводимости атмосферы ( $i_z$ ).

На втором этапе производился расчет параметров атмосферы с учетом переноса ионов в электрическом поле, но без влияния облачности или слоя примесей. Для оценки корректности описания процессов в модели провели сравнение вертикальных профилей атмосферно электрических параметров в стационарном состоянии и профилей, формируемых в результате переноса. Эти профили совпали, что свидетельствует о корректности используемой схемы расчетов.

После подтверждения правильности всех расчетов был осуществлен переход к третьему (динамическому) этапу, на котором был внесен слой с пониженной на один порядок ( $10^{-5} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ) подвижностью ионов аэрозольный слой, соответствующий инверсионному слою в атмосфере. В результате работы были получены вертикальные профили основных параметров электрического состояния атмосферы и их изменение во времени: концентрации положительных ( $n^+$ ) и отрицательных ( $n^-$ ) ионов, плотность объемного заряда в атмосфере ( $\rho$ ), ток проводимости атмосферы ( $i$ ).

После этого был введен облачный слой на том же уровне с подвижностью ионов  $10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Были получены значения вышеуказанных характеристик в новых условиях.

## 3. Результаты и обсуждение

1 этап. Восстановление профилей при стационарном состоянии.

Суточный ход вертикальной составляющей напряженности электрического поля ( $E_0$ ) и проводимость атмосферы ( $\lambda_0$ ) по данным Воейково. Явно выражена «унитарная вариация»: максимальное значение  $E_0 = 135 \text{ В/м}$  в 18 ч, минимальное значение  $E_0 = 80 \text{ В/м}$  в 4 ч. Суточные колебания напряженности электрического поля относительно среднего значения составляет 55 В/м.

Были рассчитаны профили подвижности положительных, отрицательных ионов, а также концентрации положительных и отрицательных ионов, полярные проводимости и суммарная проводимость атмосферы по

высотам и проводимо. По расчетам подвижность отрицательных ионов незначительно больше подвижности отрицательных, что подтверждается исследованиями. Так же подвижность плавно увеличивается с высотой.

3 этап. Добавление слоев с подвижностями, соответствующими аэрозольным и облачным слоям.

Расчеты показали, что до внесения слоя с измененной подвижностью ионов, все параметры увеличивались или уменьшались по экспоненциальному закону, нарушений хода не наблюдалось. Данное изменение электрических параметров с высотой соответствует многочисленным исследованиям.

Далее в профили концентраций полярных ионов были добавлен слой аэрозолей или облачный слой на высоте 900–1400 метров. Расчеты показали, что внесение слоя с измененной подвижностью ионов оказывает довольно существенное влияние на изменение концентраций с высотой, причем, чем меньше подвижность в слое, тем большее влияние он оказывает.

Расчеты проводились на период 60 минут. Оказалось, что влияние добавленного слоя распространяется до уровня 3 км, значения плотности объемного заряда увеличились на несколько порядков относительно исходного значения.

С помощью модели были получены вертикальные профили положительного, отрицательного и суммарного тока проводимости атмосферы для каждого временного шага модели. По полученным результатам можно сделать вывод, что ток проводимости в добавленном слое уменьшается на 1–2 порядка в зависимости от рассматриваемого случая.

## Выводы

Расчеты, проведенные с помощью модели электрической структуры атмосферы в условиях «хорошей погоды» согласуются с имеющимися данными, представленными в литературе

Дальнейшее преобразование модели, заключающееся в добавлении слоя устойчивости и облачного слоя, позволяет проанализировать формирования заряда облачной атмосферы, а именно:

- с уменьшением подвижности ионов в заданном слое атмосферы наблюдается увеличение скорости процессов накопления зарядов в данном слое и близлежащих слоях атмосферы;

- благодаря слою с низкой подвижностью ионов в облачном слое наблюдается накопление отрицательных зарядов в нижней части облака и в подоблачном слое и положительного заряда – в верхней части облака и над ним. Аналогичные процессы наблюдаются в слое устойчивости, по сравнению с процессами в облаке они имеют меньшую интенсивность;

- в облачном слое наблюдается резкое понижение значений тока проводимости атмосферы на уровнях, близких к нижней границе облачности, и резкое повышение до начальных значений над ним.

## Литература

1. Кашлева Л.В., Баранова М.Е., Михайловский Ю.П. К расчету электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды» // Труды Главной Геофизической Обсерватории им. А.И. Воейкова, 2018, С. 124–138

УДК 551.577.3(571.53)

## СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ТЕРРИТОРИИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

Е.А. Кочугова<sup>1,2</sup>, А.Е. Шутова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия, Kochugovae@mail.ru

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия, Shutova.arina2017@yandex.ru

В статье рассмотрены особенности режима увлажнения Иркутской области и его изменения на примере сезонных сумм атмосферных осадков. Выявлена периодичность колебаний осадков. Оценены вклад сезонных сумм в годовую изменчивость осадков и их связь с крупномасштабными атмосферными процессами. Проанализировано распределение осадков различной интенсивности.

*Ключевые слова:* режим увлажнения, атмосферные осадки, цикличность, Иркутская область, циркуляция атмосферы

The article considers the features of the humidification regime of the Irkutsk region and its changes on the example of seasonal amounts of atmospheric precipitation. The frequency of precipitation fluctuations is revealed. The contribution of seasonal amounts to the annual variability of precipitation and their relationship with large-scale atmospheric processes are estimated. The distribution of precipitation of different intensity is analyzed.

*Key words:* humidification mode, atmospheric precipitation, cyclicity, Irkutsk region, atmospheric circulation

Пространственная изменчивость, изменение сезонной структуры сумм осадков являются характеристиками, показывающими тенденции и особенности текущих колебаний регионального климата. В исследова-

ниях, лежащих в основе специальных докладов МГЭИК (Climate..., 2013; Изменение..., 2020), показаны большие неопределенности текущей и будущей динамики осадков на территории России, в том числе

Иркутской области, обусловленные естественной изменчивостью этой метеорологической величины. В этой связи исследование как пространственно-временной изменчивости осадков в разные сезоны года, так и оценка тенденций их долгопериодных изменений, являющихся целью данной работы, имеют важное научное и практическое значение.

Большая часть Иркутской области характеризуется оптимальным увлажнением и неравномерным пространственным распределением атмосферных осадков. На Среднесибирском плоскогорье и на севере области за год выпадает от 250 до 400 мм осадков (ст. Железнодорожск 395 мм, ст. Братск 370 мм). В центральных районах области годовое количество осадков увеличивается до 500 мм. На юге и юго-западе территории за год выпадает от 400 до 850 мм атмосферных осадков (ст. Иркутск 450 мм, ст. Инга 647 мм). В предгорных и высокогорных частях Восточного Саяна, Хамар-Дабана, Байкальского хребта, Северо-Байкальского и Патомского нагорий атмосферное увлажнение избыточное. Здесь на станциях Алыгджер и Хамар-Дабан отмечено наибольшее количество осадков 700 и 1404 мм соответственно. Недостаточное увлажнение наблюдается на о. Ольхон, где, к примеру, в 1910 г. годовое количество осадков составило 103 мм.

Анализ динамики сезонных и годовых сумм атмосферных осадков был выполнен на примере периода с 1950 по 2019 г. Информационной базой исследования послужили данные наблюдений ФГБУ «Иркутское УГМС» за атмосферными осадками месячного разре-

шения 17-ти метеорологических станций.

Научные исследования, посвященные изучению многолетней динамики атмосферных осадков на территории Иркутской области (Кочугова, 2018; Мотовилов и др., 2021; Осипова, 2020), указывают на разнонаправленность сезонных тенденций. В этой связи характер изменений исследуемой величины следует рассмотреть для каждого календарного сезона отдельно. По результатам обобщенных оценок (рис. 1 а) можно заключить, что летом количество осадков уменьшается. Регионально осредненный тренд летнего сезона равен  $-3,3$  мм/10 лет. Незначительным ростом атмосферных осадков характеризуются переходные сезоны (весной  $1,3$  мм/10 лет, осенью  $0,3$  мм/10 лет) (рис.1 с, d). Однако, рассматривая тенденции изменения на каждой станции отдельно, весна как переходный период между зимним и летним типом атмосферной циркуляции, отличается очень пестрой картиной распределения областей увеличения и уменьшения осадков.

В последние годы отмечается тенденция к росту атмосферных осадков в зимний период (рис.1 б). Значительное увеличение осадков зафиксировано на метеорологических станциях Братск ( $5,2$  мм/10 лет), Тайшет ( $3,3$  мм/10 лет) и Хамар-Дабан ( $2,8$  мм/10 лет). Увеличение количества твердых осадков в холодное время года, как правило, приводит к накоплению снега, а весной, на фоне стремительного роста температуры воздуха, стремительному таянию и образованию паводков. В целом на территории области годовая сумма осадков незначительно уменьшается.

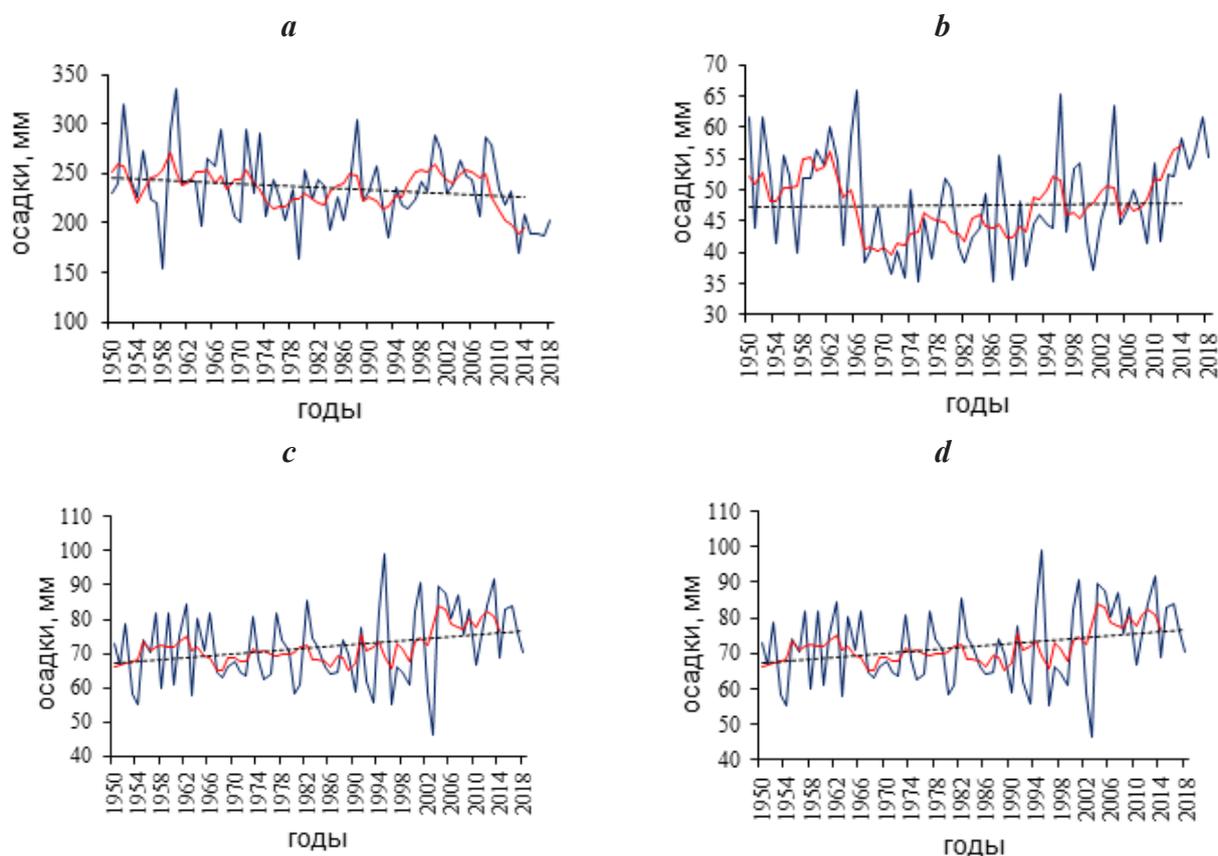


Рис. 1. Многолетняя динамика и линейный тренд (красная линия соответствует 5-летнему сглаживанию) сезонных сумм осадков осредненных по территории Иркутской области а) летом; б) зимой; в) весной; д) осенью. Дополнительными пунктирными линиями показаны линейные тренды

При исследовании пространственных закономерностей сезонных сумм осадков, следует отметить их неоднородность. Исключение составляют станции Мамакан и Братск, где наблюдается всепогодное увеличение осадков, а также Баяндай и Токма, характеризующиеся, наоборот, уменьшением. Более детальное представление о распределении трендов на территории Иркутской области дают карты-схемы (рис. 2).

Не менее интересным является анализ перераспределения осадков различной интенсивности в годовой сумме. Рассмотрим их изменения на примере станции Тайшет, расположенной в районе, где изменения наибо-

лее значительны. Воспользовавшись грациями, указанными (Наставление..., 2009), мы получили, что наибольший вклад в годовую сумму вносят слабые осадки (0–2 мм). Однако в последние десятилетия их доля стала уменьшаться, а вклад умеренных осадков (3–14 мм) увеличиваться (рис. 3). Следует отметить, что наблюдались годы (1981, 1988, 1992, 2001, 2004, 2009 г.), когда весомый вклад в годовую сумму приносили сильные (15–49 мм) осадки. Например, в 1992 г. в Тайшете сумма осадков сильной интенсивности составила 218 мм при среднегодовом значении 431 мм. В этот год доля сильных осадков превысила 40 % от годовой суммы.

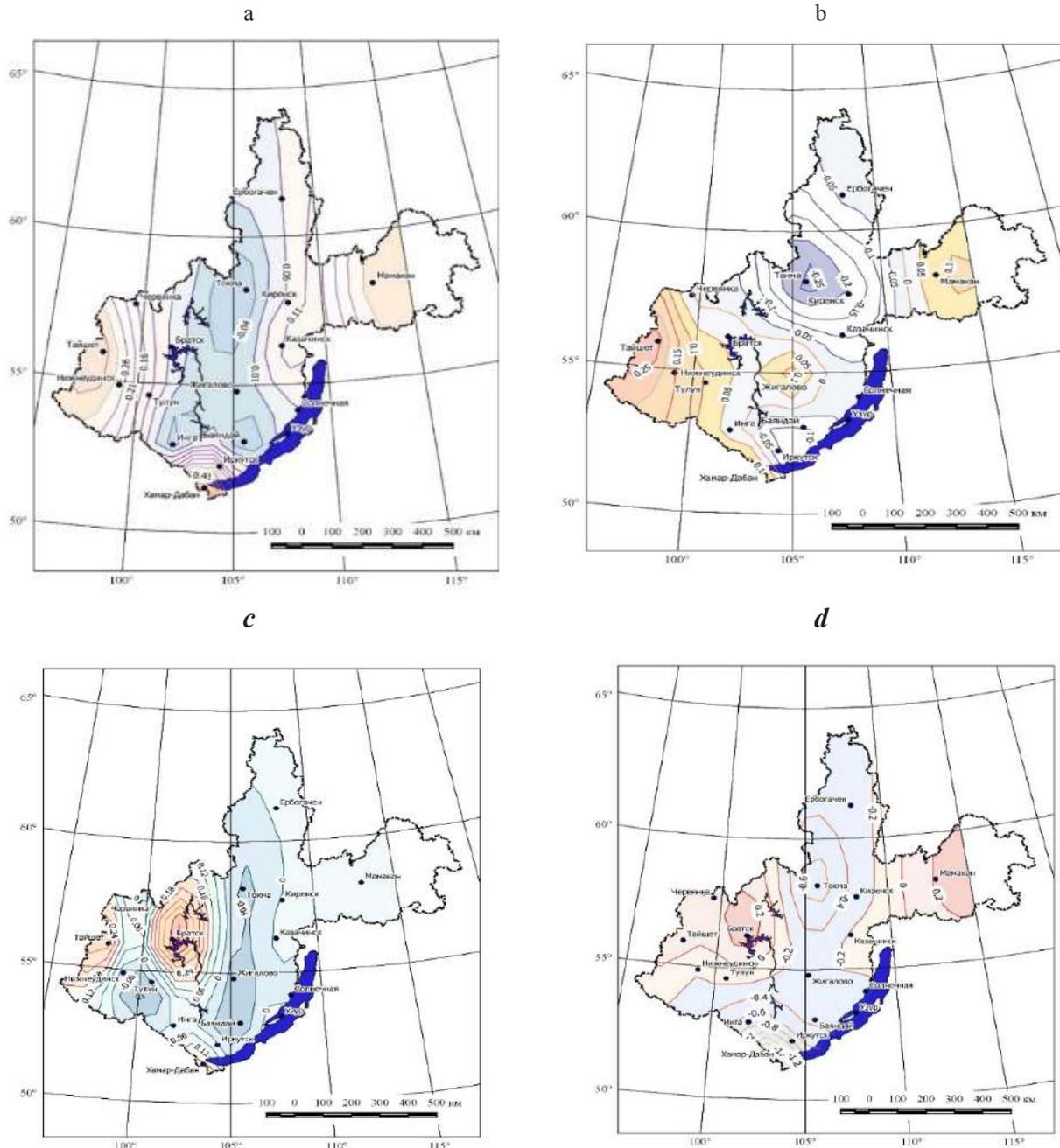


Рис. 2. Пространственное распределение линейного тренда сезонных сумм атмосферных осадков на территории Иркутской области: а) весной; б) осенью; в) зимой; д) летом

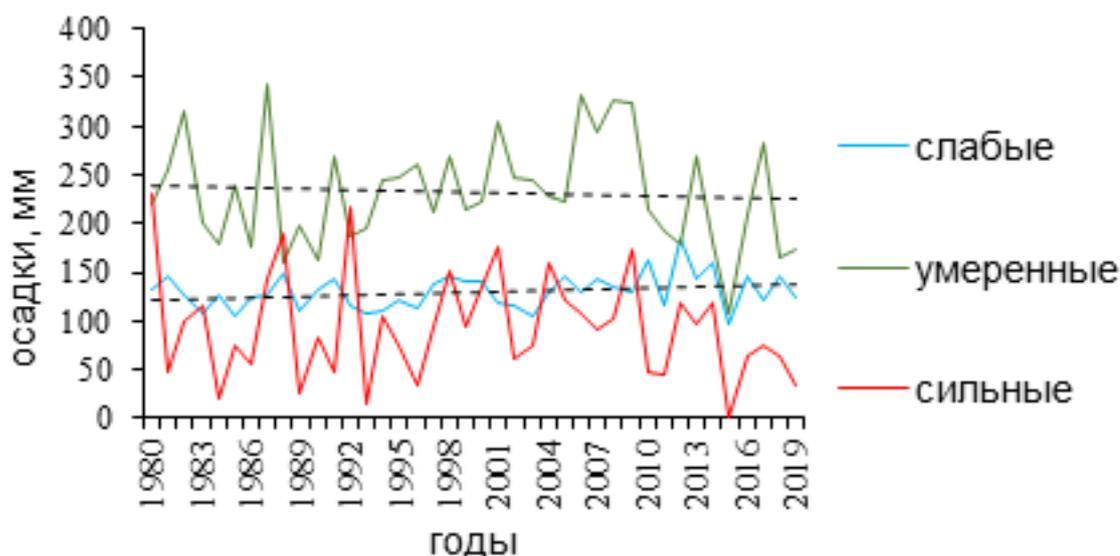


Рис.3. Вклад различных градаций в годовую сумму осадков на ст. Тайшет

В поиске причин текущих изменений была проанализирована связь с колебаниями характеристик крупномасштабной атмосферной циркуляции; на примере индексов североатлантического (САК), арктического колебания (АК) и форм атмосферной циркуляции в формулировке Г.Я. Вангенгейма–А.А. Гирса. Рассчитанные коэффициенты корреляции свидетельствуют о наличии слабой связи (коэффициенты корреляции не более 0,5). При этом АК оказывает более сильное влияние, чем САК. Кроме того, для арктического колебания характерны циклы той же длительности, что и для осадков на территории Иркутской области, продолжительность которых равна 3, 5 и 10 лет.

Таким образом, анализ пространственно-временного распределения сезонных сумм осадков показал, что режим увлажнения Иркутской области претерпевает изменения. Выражена тенденция к уменьшению годовых сумм осадков, в основном, за счет их уменьшения в летний сезон, что может привести к еще большему увеличению риска пожароопасности в регионе. В зимний период года наметилась тенденция к росту атмосферных осадков, что хорошо выражено в районе Братского и Усть-Илимского водохранилищ. Увеличение осадков в этот период года связано с изменением атмосферной циркуляции, а именно с более частыми выходами теплых циклонов с Атлантики, которые ослабляют Азиатский антициклон. Аккумуляция твердых осадков за этот период года может привести к сильным и опасным паводкам весной. В течение всего года увеличение осадков наблюдается только в западной и северо-западной части Иркутской области.

### Литература

1. Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю., Ильин Б. М. Атмосферные осадки // Тр. ГГО. 2014. Вып. 573. С. 39–64.
2. Изменение климата и земля. Специальный доклад МГЭИК об изменении климата, опустынивании, деградации земель, устойчивом управлении земельными ресурсами, продовольственной безопасности и потоках парниковых газов в наземных экосистемах (резюме для политиков). Изд-во «МГЭИК». 2020. 39 с.
3. Кочугова Е.А. Климатические изменения режима увлажнения Иркутской области в зимний период // Известия Иркутского государственного университета. Сер. Науки о Земле. 2018. Т.25. С. 107–120.
4. Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н., Полянин В.О. Катастрофические паводки в бассейне Ангары в 2019 году: моделирование условий формирования и водного режима рек // Известия РАН. Сер. Географическая. 2021. Т.85. № 2. С. 302–316.
5. Наставление по краткосрочным прогнозам погоды общего назначения: РД 52.27.724 – 2009 (Росгидромет). Обнинск: Изд-во «ИГ – СОЦИН». 2009. 66 с.
6. Осипова О.П. Синоптические условия формирования катастрофических паводков в Иркутской области в 2019 // География и природные ресурсы. 2020. №4 (163). С. 156–165.
7. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

## ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В РЕЖИМАХ ТЕМПЕРАТУРЫ, ОСАДКОВ И СНЕЖНОГО ПОКРОВА В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СИБИРИ КАК ОТКЛИК ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

А.С. Кошкина\*, О.Н. Топтунова, О.Г. Анискина, О.В. Волобуева, Я. В. Дробжева

*Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, Санкт-Петербург, Россия, koshkinapost@mail.ru, olgakolp@yandex.ru*

В работе представлены результаты исследования климатических изменений на северо-западе Сибири. Отмечена связь между индексом Североатлантического колебания (САК), формами циркуляции атмосферы (типизация по Вангенгейму и Гирсу), температурой и динамикой осадков. Проанализированы данные 15 метеостанций.

*Ключевые слова:* Климат Сибири, климат Арктики, изменение климата, циркуляция атмосферы, Северо-Атлантическое колебание.

It was presented the results of climate change research in the northwestern part of Siberia. The character and depth complexity between the North Atlantic Oscillation (NAO) indexes, forms of the atmosphere's circulation (typification according to Vangengeim and Girs), temperature and precipitation dynamics are analyzed. The data of 15 weather stations are analyzed

*Keywords:* Arctic climate, climate change, atmospheric circulation, North Atlantic Oscillation.

Северо-западная часть Сибири является одним из богатейших по своим природным запасам регионом. В данной работе география исследования включала побережье Печорского моря, полуострова Ямал и Гыданский. Регион этот занимает одно из ведущих мест в России по запасам и добыче углеводородов, природного газа и нефти, которые являются важнейшими источниками для мировой энергетики, а потому представляет особый интерес с точки зрения изучения синотических и климатических особенностей.

В ходе работы были проанализированы ряды температур и осадков 15 метеостанций, находящихся на территории Ненецкого и Ямало-Ненецкого автономных округов: Амдерма, Мыс Константиновский, Нарьян-Мар, Хоседа-Хард, Моррасале, Антипаюта, Новый Порт, Халясавэй, Толька, Салехард, Им Попова, Тазовск, Ныда, Надым, Тарко-Сале

### Исходные данные

Источником данных послужил Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных ГУ ВНИИГМИ-МЦД ([aisori.meteo.ru/ClimateR](http://aisori.meteo.ru/ClimateR)). В качестве данных о ветре на изобарической поверхности 500 ГПа использовался реанализ NCEP Reanalysis Products Pressure Level Data (Specify dimension values) ([www.esrl.noaa.gov/](http://www.esrl.noaa.gov/)), доступный с 1948 года. Источником данных о САК за каждый месяц, начиная с 1950 года, является Центр прогноза климата национальной администрации по океану и атмосфере (National Oceanic and Atmospheric Administration's – NOAA). В работе использовался индекс NAOоб ([www.esrl.noaa.gov/](http://www.esrl.noaa.gov/)). Также в работе использовались данные о типах циркуляции атмосферы согласно типизации по Вангергейму-Гирсу (Анисимов, Жильцова, Захарова, 2009).

Для оценки климатических изменений и различий оценивался базовый период (с 1961 по 1990 гг) и период новой оперативной нормы, признанный ВМО (с 1981 по 2010 гг.). Оценивалась разница в нормах по температуре и осадкам, а также аномалии этих величин. Ряды метеорологических величин аппроксимировались линейными уравнениями, для принятия гипотезы о наличии тренда в изменении исследуемых метеовеличин значимость полученных изменений анализировалась с помощью t-статистики Стьюдента при 5 % уровне значимости. Также t-статистика Стьюдента при том же уровне значимости использовалась для оценки корреляций температуры с индексом Северо-Атлантического колебания.

### Результаты исследования

Были рассчитаны значения изменения соотношения трех типов атмосферной циркуляции по Вангенгейму-Гирсу ( W, E и C). В целом отмечено увеличение доли циркуляции W в новой оперативной норме относительно базового периода на 8,9 %, в основном за счет уменьшения доли E циркуляции (понижилась на 8,8 %). При 5 % уровне значимости изменения W и E циркуляции значимы.

Рассмотрим географическое распределение среднегодовых температур и осадков региона, осредненных за период новой оперативной нормы (рис. 1 ).

Анализируя географическое распределение температуры, можно отметить, что в целом по территории прослеживается как широтная, так и зональная составляющие распределения температур. Например, на востоке территории явно видно влияние широтной составляющей. При движении же на запад температуры изменяются в положительную сторону, что может быть объяснено влиянием теплых воздушных масс, приходящих с Атлантики, и не продвигающихся восточнее

из-за Новой земли и Урала, являющихся естественным географическим барьером. Географическое распределение среднемесячных сумм осадков также носит зональный характер распределения. На станциях, расположенных западнее, отмечаются бóльшие значения сумм осадков. Исходя из географического распределения максимальной глубины снежного покрова можно сказать, что наибольшие значения наблюдаются на

южных станциях (причем такое соотношение сохраняется в течение всего года, лишь в июне, когда на южной части территории температуры становятся более высокими, максимум смещается за полярный круг).

Если говорить о сдвиге метеопараметров в новую оперативную норму относительно базовой, обратимся к рис. 2.

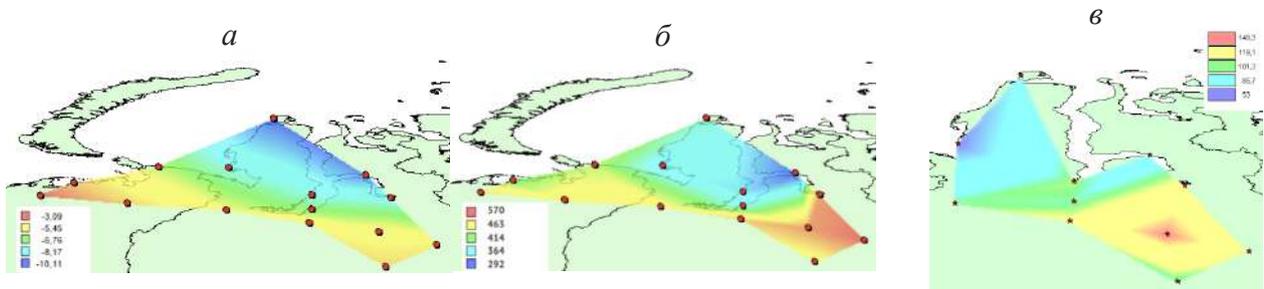


Рис. 1 Географическое распределение среднегодовых значений температуры (а), сумм осадков (б) и максимальной высоты снежного покрова (в), осредненных за период 1981–2010 гг.

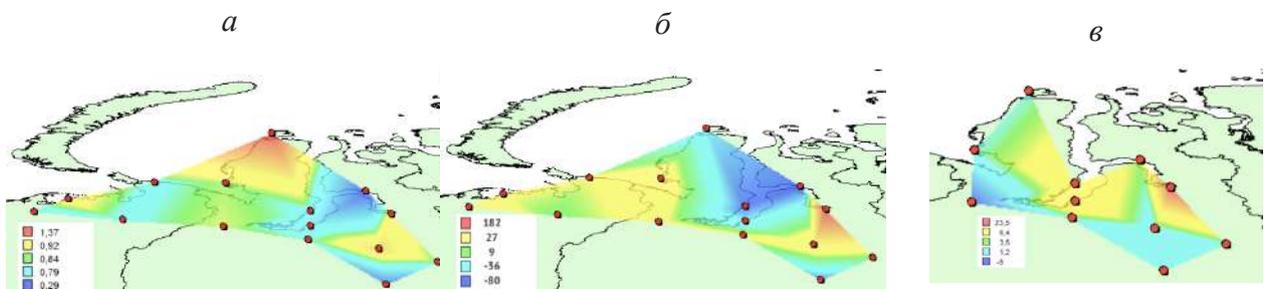


Рис. 2 Географическое распределение изменения температуры (а), изменения сумм осадков (б) и глубины снежного покрова (в)

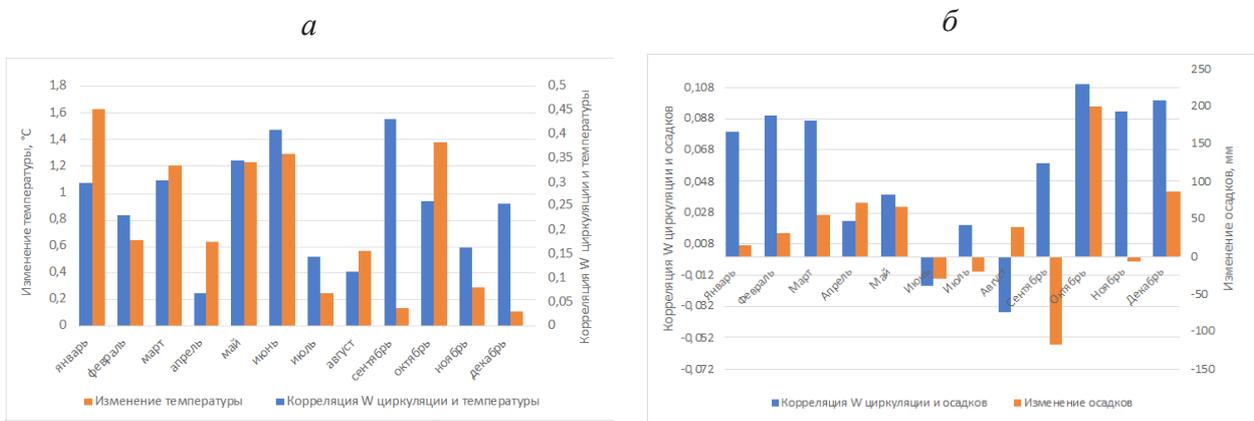


Рис. 3 Годовое распределение величины корреляции W циркуляции и изменения температуры (а) и величины корреляции W циркуляции и изменений осадков (б)

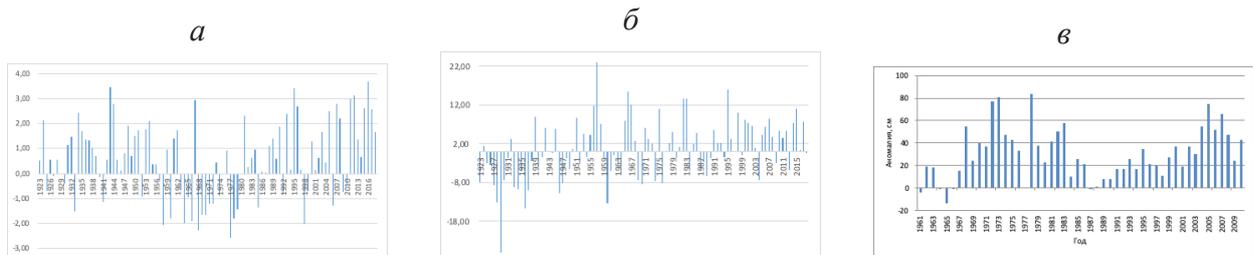


Рис. 4 Многолетний ход аномалий температуры (а), осадков (б), высоты снежного покрова (в)

Так как многолетние значения аномалий имеют схожее годовое распределение для всей территории, для анализа многолетнего хода аномалий температуры и осадков был выбран наиболее длинный ряд климатических параметров. Таким пунктом оказался Салехард, столица ЯНАО.

Изменение температуры носит как широтный характер распределения (наибольшие изменения отмечаются на севере), так и циркуляционный характер. Согласно расчетам, температура выросла на всей рассматриваемой территории, в среднем значение изменения составило 0,8 °С. Географические распределения изменения осадков и глубины снежного покрова также носят циркуляционный характер и схожи с географическим распределением изменения температуры. Годовая сумма осадков при этом увеличилась в среднем на 11 мм в год, а максимальная высота снега в среднем выросла на 4,5 см.

Для западной формы циркуляции в исследуемом регионе характерно движение циклонов с западного и юго-западного направления. При этом чисто западные процессы могут блокироваться горами Полярного Урала, а перенос циклонов с юго-запада осуществляется беспрепятственно и как раз приходится на ту часть региона (юго-восточная часть), где встречаются наибольшие значения изменения температуры, сумм осадков и высоты снега. Встреча с арктическими воздушными массами на этой территории способствует обострению характера фронтов и создает благоприятные условия для выпадения обильных осадков.

При анализе распределения изменения температуры по месяцам было замечено, что температура в регионе меняется достаточно равномерно, а в месяцы, когда связь между значением доли  $W$  циркуляции и температурой более сильная, наблюдается большее повышение температуры. То же прослеживается и в годовом распределении осадков (рис. 3).

Исходя из распределения аномалий температуры по годам (см. рис.4), можно сказать, что начиная с 1980-х гг. начали преобладать и расти положительные аномалии температуры. Именно в 1980 году по многим исследованиям началось глобальное потепление (Латонин, Бобылев, Йоханнессен и др., 2020). Рост аномалий осадков не так заметен, но также видно преобладание положительных аномалий последние 30 лет. На многолетнем ходе аномалий глубины снежного покрова видно, что в новую оперативную норму практически отсутствуют отрицательные значения.

Была рассмотрена связь между повторяемостью положительных и отрицательных аномалий температуры и сумм осадков и ведущими потоками на 500 ГПа. В целом наибольшие аномалии температуры (и положительные и отрицательные) наблюдаются при западных (270°) и северо-западных (315°) ведущих потоках. Наибольшие аномалии осадков – при западных и юго-западных потоках. Этот вывод достаточно логичен, так как в атмосфере преобладает западная циркуляция, однако показывает, что при всех этих аномалиях ведущие потоки были достаточно стандартными.

Также на примере Салехарда было рассмотрено влияние Северо-Атлантического колебания на среднегодовые значения температур и осадков.

North Atlantic Oscillation (NAO) или как его называют Северо-Атлантическое колебание (САК) является одним из источников климатической изменчивости, оказывающее влияние на погоду в пределах атлантико-европейского региона. Так, корреляция зимних значений индекса САК и аномалий температуры воздуха в северной Европе составляет 0,7–0,8) (Johnson N.C., Feldstein S.B., Tremblay D., 2008). Кроме того, САК является одним из важнейших характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы, оказывающим значимое влияние на основные гидрометеорологические поля в атлантико-европейском регионе, в частности на аномалии температуры.

Связь между Северо-Атлантическим колебанием и метеорологическими параметрами региона была рассмотрена с помощью спектрального метода.

Были рассчитаны коэффициенты разложения для многолетних рядов (1950-2018 гг.) температур, осадков, максимальных глубин снега и индексов САК, осредненные за период с декабря по март. В качестве базисной функции использовалась экспонента: .

Наибольшие по значению коэффициенты разложения совпадают для рядов метеопараметров и индексов САК, и наблюдаются при волновых числах  $m=19$  и  $m=25$ , что соответствует длинам волн с периодом  $L=3,5$  и  $L=2,7$  лет. Это говорит о связи температуры, осадков и глубины снежного покрова с величиной САК в зимние месяцы.

## Выводы

Температура, количество осадков и глубина снежного покрова в регионе увеличились в новую оперативную норму относительно базового периода. Кроме того, увеличились и аномалии температур и осадков. Среднемесячные температуры, суммы осадков и глубина снежного покрова имеют значимую корреляционную связь с индексом Северо-Атлантического колебания. Наибольшие изменения температуры и осадков наблюдаются в месяцы, когда связь между  $W$ -типом атмосферной циркуляции и метеорологическими параметрами наибольшая, при этом наибольшие климатические изменения всех рассматриваемых метеопараметров наблюдаются на юге и западе территории. Таким образом, анализируемые изменения в основном являются следствием изменения и перестройки циркуляции в условиях меняющегося климата.

## Литература

1. Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Захарова О.К. Формы атмосферной циркуляции и распределение аномалий температуры воздуха и осадков: анализ для среднеазиатского региона и возможности прогноза. 2009
2. Латонин М.М., Бобылев Л.П., Йоханнессен О.М., Кузьмина С.И., Башмачников И.Л. Арктическое усиление по данным наблюдений и моделей // Материалы V Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2020
3. Johnson N.C., Feldstein S.B., Tremblay D. The continuum of Northern Hemisphere teleconnection patterns and a description of the NAO shift with the use of selforganizing maps // J. Climate. 2008. V. 21, No. 23. pp. 6354–6371.

## КЛИМАТ И ЗДОРОВЬЕ

И.В. Кужевская

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, ivk@ggf.tsu.ru*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 p\_a.

Изменение климата может увеличить риск возникновения условий, превышающих способность человека к терморегуляции. Около половины от общей смертности, связанной с жарой во время волны тепла вызвано влиянием городского острова тепла. Рассмотрены случаи волн тепла на территории юга Западной Сибири с 1990 по 2020 гг. и циркуляционные условия их образования. Получено, что в начале периода исследования чаще отмечались волны тепла продолжительностью до 6 дней, в последний пятилетний период продолжительностью более 11 дней.

*Ключевые слова: волны тепла, температурные аномалии*

Climate change can increase the risk of conditions that exceed a person's ability to thermoregulatory. About half of the total mortality associated with heat waves is caused by the influence of an urban heat island. The cases of heat waves in the territory of southern Western Siberia from 1990 to 2020 and their circulatory conditions are considered. It is obtained that heat waves of up to 6 days duration were more frequent at the beginning of the study period, in the last five-year period lasting more than 11 days.

*Ключевые слова. heat waves, temperature abnormalities*

Климат является одним из основных факторов, которые контролируют изменчивость экосистем и, следовательно, влияют на возможность вспышек некоторых заболеваний. Очевидно, что общий риск заболевания зависит не только от воздействия окружающей среды, но также от чувствительности и адаптационных возможностей организма человека и места, в котором он возникает. Взаимодействия между окружающей средой и обществом происходят через прямые или сложные взаимосвязи, включая экстремальную жару или холод, загрязнение воздуха, аэроаллергены, заболевания, передаваемые через воду и продукты питания, болезни, передаваемые грызунами или насекомыми.

Всемирная организация здоровья (ВОЗ) определила термин «здоровье» как «состояние полного физического, психического и социального благополучия, а не просто отсутствие болезней или недугов». Любое же заболевание относится конкретно к нарушению физиологических функций организма человека в результате многих причин: инфекции патогеном, генетической проблемы или экологического стресса и т.д. Изменение климата, как отмечается в статье (Comrie, 2007) может повлиять на экосистемы таким образом, что это не только усилит физические заболевания, но и создаст условия, которые повлияют на психическое и социальное благополучие, например, в результате наводнений и засухи, воздействующих на жилые помещения, продовольственную безопасность и средства к существованию.

Существующие в настоящее время научные работы по влиянию изменения климата на здоровье человека основываются, главным образом, на изменениях показателей заболеваемости (инфекционной и неинфекционной этиологии) и смертности населения в периоды резких изменений температур (Ревич, 2011; Кобышева, 2016; Мора, 2017; Гарганеева, 2017).

Изменение климата может увеличить риск возникновения условий, превышающих способность человека к терморегуляции. Выживаемость организмов в естественных условиях непрерывно изменяющейся внешней среды невозможна без адаптации к теплу и холоду. Для того, чтобы находиться в пределах регулирования, организм должен поддерживать баланс между собственной теплопродукцией, возможными приращениями и отдачей тепла. Тепло вырабатывается в результате процессов обмена веществ, необходимых для жизнедеятельности организма. Большая часть энергии, потребляемой организмом, выделяется в виде тепла. Организм может отдавать это тепло путем конвекции (нагревая воздух или воду вокруг тела), теплопроводности (путем соприкосновения с твердыми телами), дыхательного излучения (вдыхаемый воздух обычно холоднее и суше выдыхаемого) и испарения пота (Ассман, 1966).

По некоторым оценкам (Гудков, 2012) организм человека, в частности его дыхательная система, реагирует только на абсолютное содержание влаги в воздухе, а не на относительную влажность, которая характеризует степень насыщения воздуха водяным паром. Местное воздействие холодного воздуха на слизистую оболочку верхних дыхательных путей, трахеи и бронхиального дерева вызывает значительную потерю тепла и влаги, идущих на согревание и увлажнение вдыхаемого воздуха. Особое значение приобретает высокая влажность воздуха в сочетании с низкой температурой при значительной скорости движения воздуха. Ветер существенно усиливает охлаждение организма. Также ветер существенно затрудняет дыхание и увеличивает физические нагрузки при передвижении, способствует появлению определенных эмоций, таких как повышение возбудимости ЦНС, головные боли, ощущение

тревоги и тоски за счет непрерывного звукового эффекта, сопровождающего ветер.

Необходимо отметить, что имеющиеся на сегодняшний день данные о влиянии метеоусловий на течение заболеваний весьма противоречивы, механизмы влияния погодных факторов остаются неясными. Основные закономерности, которые обсуждаются в публикациях, посвященных влиянию метеофакторов на заболеваемость и смертность от сердечно-сосудистых заболеваний, это зависимости:

- 1) от сезона года,
- 2) температуры воздуха вне помещений,
- 3) атмосферного давления,
- 4) абсолютной влажности воздуха,
- 5) солнечной активности и изменений электромагнитного поля Земли.

Многие исследователи отмечают, что сезонность сердечно-сосудистых заболеваний наиболее выражена у людей, живущих в более мягком климате (Гудков, 2012), которые менее адаптированы к резким колебаниям погодных условий, используют недостаточно теплую одежду во время пребывания на улице и слабое отопление жилых помещений в холодную погоду. Напротив, меньшему риску зимнего увеличения смертности подвержены популяции, проживающие в регионах с меньшей амплитудой сезонных изменений температуры воздуха, как правило, с прохладным летом и относительно холодной зимой.

Урбанизация и индустриализация помимо улучшения качества жизни также приводит к негативным последствиям. К таким негативным последствиям относится изменение местного климата городов, про-

являющееся, например, в формировании городского острова тепла. Актуальность в изучении городского острова тепла растет вместе с ростом городов. По данным Организации Объединенных Наций в 2018 году примерно 55,3% жителей Земли проживало в городских поселениях, а к 2030 их число увеличится до 60% (The World's..., 2018). В связи с чем все большее количество людей затрагивают проблемы, связанные с возникновением городского острова тепла, среди которых: увеличение потребление энергии, изменение ареалов обитания патогенных микроорганизмов и вредителей, увеличение количества выпадающих осадков и даже увеличение смертности (Yow, 2007). Авторами (Heaviside, 2016) было выявлено, что около половины от общей смертности, связанной с жарой во время волны тепла в Уэст-Мидлендсе (Великобритания), было вызвано последствиями влияния именно городского острова тепла. В целом же количество смертей городских жителей от жары увеличивается. Так, по данным (Zhao, 2021) смертность выросла на 0,21 % за период с 2000 по 2019 год.

В настоящей работе рассмотрены случаи волн тепла на территории юга Западной Сибири с 1990 по 2020 гг., а также циркуляционные условия их образования на основе типизации Дзердзеевского Б.Л. На рисунке приводится повторяемость различной продолжительности волн тепла. На рисунке видно, что в начале периода исследования чаще отмечались короткие волны тепла продолжительностью до 6 дней, в последний пятилетний период продолжительные волны тепла отмечаются чаще. Нужно отметить, что различия в повторяемости не превышают 6 %.

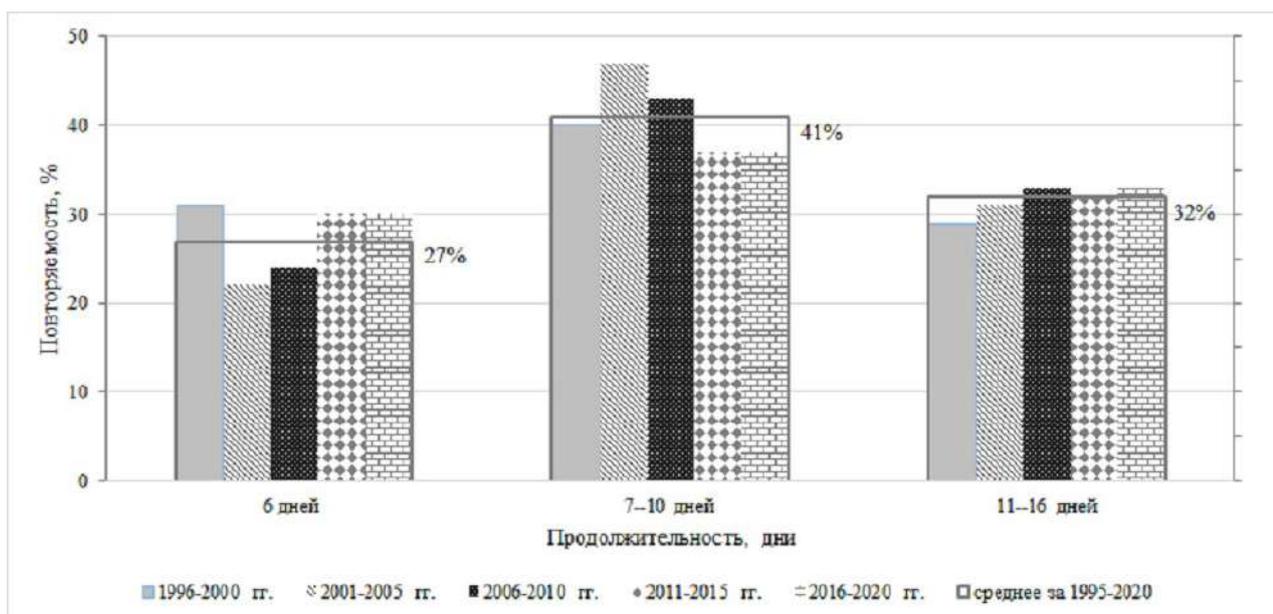


Рисунок. Повторяемость различной продолжительности волн тепла по пятилетиям

На основе анализа данных об атмосферной циркуляции (<https://atmospheric-circulation.ru>) были проанализированы циркуляционные условия на территории Западной Сибири в дни волн тепла. Развитие волн тепла происходит при формировании над Западной Сибирью ядра повышенного давления или антициклона, часто обширная область повышенного давления на значительной части Евразии, вторжение арктического воздуха пополняет континент антициклон. Либо развитие происходит при блокирующих процессах над Западной Европой и прорывах южных циклонов на Сибирь. Заканчиваются процессы волны тепла практически при одних и тех же условиях образования над центральной Арктикой летней депрессии, выходы южных циклонов на Сибирь.

### Литература

1. Ассман Д. Чувствительность человека к погоде Л.: Гидрометеиздат. 1966. 266 с.
2. Гарганеева А.А., Кужелева Е.А., Горбатенко В.П., Округин С.А., Кузевская И.В. Особенности развития и течения острой коронарной недостаточности в период экстремально жарких погодных условий // Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2017. Т.16. № 5. С. 52–56. Doi: 10.15829/1728-8800-2017-5-52-56
3. Гудков А.Б., Попова О.Н., Лукманова Н.Б. Эколого-физиологическая характеристика климатических факторов Севера обзор литературы // Экология человека. 2012. №. 1. С.12–17.
4. Кобышева Н.В., Ключева М.В. Современные проблемы медицинской климатологии // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2016. №. 581. С. 103–115.
5. Ревич Б.А., Малеев В.В. Изменения климата и здоровье населения России. М.: URSS. 2011. 208 с.
6. Comrie A. Climate change and human health // Geography Compass. 2007. Т. 1. №. 3. С. 325–339.
7. Heaviside C., Vardoulakis S., Cai X. Attribution of mortality to the Urban Heat Island during heatwaves in the West Midlands, UK // Environmental Health. 2016. V. 15. pp. 49–59.
8. Mora C. et al. Global risk of deadly heat // Nature climate change. 2017. Т. 7. №. 7. С. 501–506.
9. The World's Cities in 2018. Data Booklet. DOI: <https://doi.org/10.18356/c93f4dc6-en>.
10. Yow D. Urban Heat Islands: Observations, Impacts, and Adaptation // Geography Compass. 2007. V. 1, No 6. pp. 1227–1251.
11. Zhao Q. et al. Global, regional, and national burden of mortality associated with non-optimal ambient temperatures from 2000 to 2019: a three-stage modelling study // The Lancet Planetary Health. 2021. Т. 5. No 7. pp. e415-e425.

УДК 551.576; 551.583

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НИЖНЕЙ СЛОИСТООБРАЗНОЙ ОБЛАЧНОСТИ И ЕЕ ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ СИБИРСКОГО РЕГИОНА

Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, lnya@iao.ru*

Работа выполнена в рамках государственного задания Института оптики атмосферы СО РАН.

В работе исследуется режим нижней слоистообразной облачности (Sc, St, Ns) и ее долговременные изменения над территорией Сибирского региона на основе данных 50-летних (1969–2018 гг.) 8-срочных наблюдений 62 метеорологических станций (<http://www.ncdc.noaa.gov/>) для четырех сезонов (зимы, весны, лета и осени).

*Ключевые слова:* количество нижней слоистообразной облачности, долгопериодные изменения, тренды, Сибирский регион.

The work presents a study of the low stratus cloud regime (Sc, St, Ns) and its long-term changes over the Siberian region territory based on the data of 50-year (from 1969 to 2018) 8-term observations of 62 meteorological stations (<http://www.ncdc.noaa.gov/>) for four seasons (winter, spring, summer and autumn).

*Key words:* amount of lower stratus clouds, long-term changes, trends, Siberian region.

Одной из проблем современной климатологии является проблема глобального и регионального изменения климата, где важную роль играет облачность, в том числе нижнего яруса (Sc, St, Ns), поскольку облачность оказывает существенное влияние на радиационные потоки системы «земная поверхность – атмосфера» (Кондратьев, Биненко, 1984), (Жеребцов и др., 2004).

При этом важнейшую роль играет тип облачности, поскольку облака верхнего яруса в целом способствуют усилению парникового эффекта и тем самым нагреванию климатической системы, а облака нижнего яруса, отражая приходящую солнечную радиацию – наоборот ее выхолаживанию (Hartman, 1992). Причем, влияние облаков нижнего яруса зависит от сезона (Шерстюков,

2011): в холодное полугодие они создают парниковый эффект, повышая температуру земной поверхности, а в теплое полугодие, отражая приходящую солнечную радиацию, ту же температуру понижают.

Поскольку облачность относится к числу наиболее изменчивых во времени и в пространстве элементов климата (Кондратьев, Биненко, 1984), (Климат ..., 2001) и претерпевает заметные долговременные колебания, возникает необходимость постоянной переоценки тенденций ее изменения по новейшим данным, как на глобальном, так и на региональном уровнях. В последние годы данному вопросу уделялось большое внимание (Климат ..., 2001), (Байкова и др. 2002), (Журавлева и др., 2006), (Дюкарев и др., 2006), (Хлебникова, Салль, 2009), (Второй..., 2014), но все еще не сложилось единого мнения о современных (вторая половина XX в. – начало XXI в.) тенденциях долговременного изменения количества облаков нижнего яруса над территорией Сибирского региона. Так, согласно (Хлебникова, Салль, 2009), в течение периодов (1951–2000) и (1976–2005) над Азиатской территорией России во все сезоны наблюдалось уменьшение количества облаков нижнего яруса. Однако, по данным других авторов (Байкова и др. 2002), (Журавлева и др., 2006), (Складнева и др., 2018) характерно, наоборот, увеличение количества нижней облачности.

Кроме того, сведения о статистической структуре характеристик нижней слоистообразной облачности, а именно, о ее количестве, и тенденциях его изменения, необходимы для решения многих прикладных задач дистанционного оптического зондирования атмосферы (Зуев, Зуев, 1992).

Данная работа продолжает исследования (Комаров и др., 2015, 2015), при этом ряд наблюдений за облачностью увеличился. В работе по данным 50-летних (1969–2018 гг.) 8-срочных наблюдений 62 метеорологических станций (<http://www.ncdc.noaa.gov/>) исследуется режим нижней слоистообразной облачности и ее долговременные изменения над территорией Сибирского региона. Проведено исследование среднесезонных значений количества слоистообразных облаков нижнего яруса, рассчитанных для четырех сезонов (зимы, весны, лета и осени). Для статистического анализа особенностей долговременных изменений количества облаков нижнего яруса были использованы кривые межгодового хода, а также линейные тренды долговременного изменения среднесезонных и среднегодовых значений и величины их интенсивности (баллы/10 лет).

Рассмотрим результаты исследования пространственного распределения количества слоистообразной облачности нижнего яруса над территорией Сибирского региона (рис. 1).

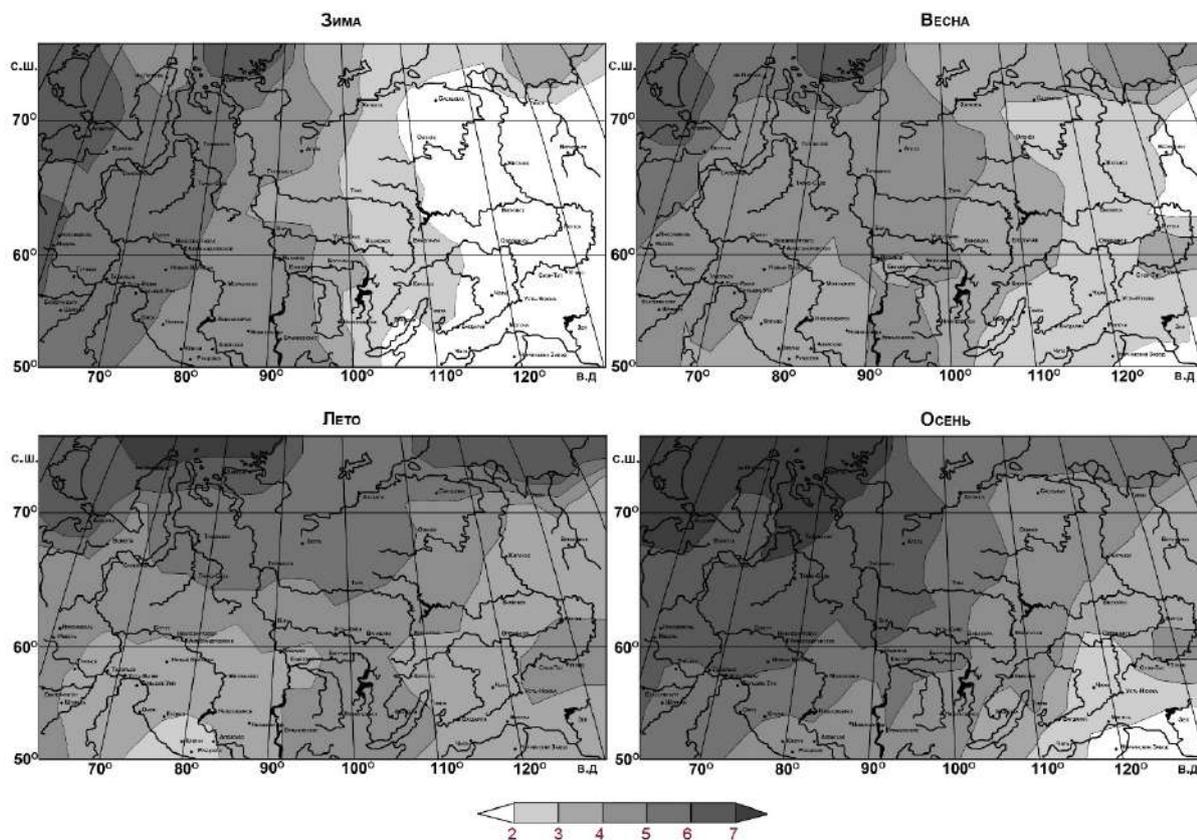


Рис. 1. Пространственное распределение по территории Сибири среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности (баллы), полученное по данным за 1969–2018 гг.

В результате проведенного анализа установлено, что поле нижней облачности меняется от сезона к сезону. Во все сезоны, за исключением лета, количество нижней слоистообразной облачности значительно выше над территорией Западной Сибири, чем над Восточной Сибирью, при этом ее количество убывает с северо-запада в юго-восточном направлении. Летом максимальное количество нижней слоистообразной облачности наблюдается на севере Сибирского региона (севернее 70° с.ш.) и убывает в южном направлении. Наибольшее количество слоистообразных облаков нижнего яруса отмечается в полярной зоне всего Сибирского региона летом и осенью, причем наиболее высокие значения – над территорией Западной Сибири (5,5–7,0 баллов), где хорошо развита циклоническая деятельность. Наименьшее количество слоистообразной облачности нижнего яруса (1,2–1,8 баллов) наблюдается зимой над Восточной Сибирью и находится в тесной связи с высоким атмосферным давлением и низкими температурами, характерными для господствующего здесь Сибирского антициклона.

Рассмотрим результаты статистической оценки современных тенденций долговременного изменения количества нижней слоистообразной облачности, наблюдаемого над Сибирским регионом. На рис. 2 показано пространственное распределение по территории Сибири значений интенсивности линейных трендов

(баллы/10 лет) долговременного изменения среднесезонных значений количества слоистообразных облаков нижнего яруса, полученные для временного интервала (1969–2018 гг.) по данным 62-ти сибирских станций.

Анализ долговременных изменений количества слоистообразной облачности нижнего яруса показал, что за рассматриваемый период (1969–2018 гг.) зимой и весной на территории Сибири преобладала тенденция к увеличению среднесезонного количества нижней слоистообразной облачности с интенсивностью от 0,10 до 0,40 балла/10 лет. При этом зимой максимальный тренд наблюдается в полярных районах Западной (0,40–0,60 балла/10 лет) и Восточной Сибири (0,40–0,70 балла/10 лет), а весной – в полярных областях Восточной Сибири (0,40–0,70 балла/10 лет).

Летом характер распределения линейных трендов долговременных изменений количества нижней слоистообразной облачности существенно отличается от зимне-весеннего распределения. Так на большей части территории Западной Сибири севернее 60-ой параллели в летний период преобладают отрицательные тренды до -0,20 балла/10 лет, а в районе 70-ой широты и севернее величина отрицательного тренда достигает -0,30 балла/10 лет. В то же время летом на большей части территории Восточной Сибири наблюдаются положительные тренды нижней слоистообразной облачности с максимумом (0,50–0,65 балла/10 лет) на юго-востоке.

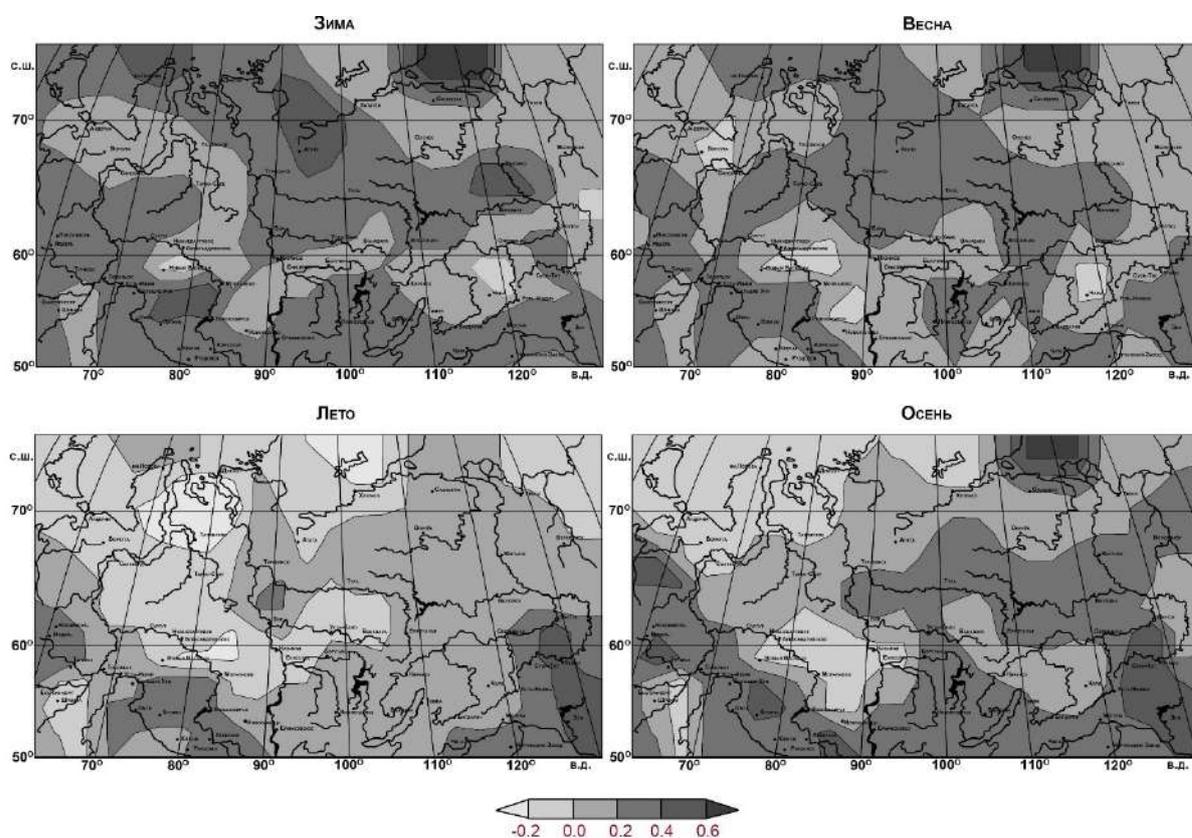


Рис. 2. Пространственное распределение по территории Сибири интенсивностей линейных трендов долговременного изменения среднесезонного количества слоистообразных облаков нижнего яруса (баллы/10 лет).

Осенью на территории Сибирского региона преобладают положительные тренды изменения количества облаков нижнего яруса (0,20–0,40 балла/10 лет). Максимальные положительные тренды наблюдаются на юге региона и на севере Восточной Сибири. Отрицательные тренды отмечаются на севере Западной Сибири и в ее центральной части (от 0 до -0,20 балла/10 лет).

Таким образом, для поля нижней слоистообразной облачности характерна зависимость от сезона. Во все сезоны, за исключением лета, максимум количества облаков нижнего яруса отмечается над Западной Сибирью, а минимум – над Восточной, при чем количество облачности убывает с северо-запада в юго-восточном направлении. В летний сезон максимум наблюдается на севере Сибирского региона и количество нижней слоистой облачности убывает в южном направлении.

Исследования долговременных изменений количества слоистообразной облачности нижнего яруса за 50-летний период с 1969 по 2018 гг. показали, что для зимы и весны характерно преобладание на территории Сибири положительных трендов, при этом максимальный тренд наблюдается в полярных районах. Летом на большей части территории Западной Сибири и в полярных районах всего Сибирского региона отмечаются отрицательные тренды количества облаков нижнего яруса. Также тенденция уменьшения нижней слоистообразной облачности проявляется осенью в полярных областях Западной Сибири.

### Литература

1. Байкова И.М., Ефимова Н.А., Строкина Л.А. Изменение облачного покрова над территорией России. Метеорология и гидрология. 2002. № 9. С. 52–61.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. Т. 1. 59 с.
3. Дюкарев Е.А., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Изменение климата азиатской территории России во второй половине XX столетия: сравнение данных наблюдений реанализов // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т.19. № 11. С. 934–940.
4. Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Молодых С.И. Радиационный баланс атмосферы и климатические проявления солнечной переменности // Оптика атмосферы и океана, 2004. Т.17. №12. С. 1003–1012.
5. Журавлева Т.Б., Рассказчикова Т.М., Складнева Т.К., Смирнов С.А. Статистика облачности над г. Томском: данные наземных наблюдений 1993–2004 гг. // Оптика атмосферы и океана, 2006. Т.19. №10. С. 880–886.
6. Зуев В.Е., Зуев В.В. Дистанционное оптическое зондирование. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 232 с.
7. Климат России / Под ред. Н.В. Кобышевой. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 655с.
8. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриненко А.В. Статистическая структура и долговременные изменения нижней слоистообразной облачности над регионом Сибири как основа для метеорологической поддержки решения прикладных задач. Часть 1. Статистика нижней слоистообразной облачности // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 07. С. 622–629.
9. Комаров В.С., Матвиенко Г.Г., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриненко А.В. Статистическая структура и долговременные изменения нижней слоистообразной облачности над регионом Сибири как основа для метеорологической поддержки решения прикладных задач. Часть 2. Долговременные изменения нижней слоистообразной облачности. // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 07. С. 630–637.
10. Кондратьев К.Я., Биненко В.И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 240 с.
11. Складнева Т.К., Рассказчикова Т.М., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю. Изменение радиационных и метеорологических параметров атмосферы по данным наблюдений в Томске // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 04. С. 288–293
12. Хлебникова Е.И., Салль К.А. Особенности климатических изменений облачного покрова над территорией России // Метеорология и гидрология. 2009. №7. С. 5–13.
13. Шерстюков Б.Г. Изменения, изменчивость и колебания климата. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГ-МИ-МЦД». 2011. 293 с.
14. Hartmann D.L., Ockert-Bell M.e., Michelsen M.L. The effect of cloud type on the Earth's energy balance: Global analysis // J. Climate, 1992, №5. pp.1281–1304.

## ВЛИЯНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЛЕБАНИЙ НА УСЛОВИЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ В БАЙКАЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

Е.В. Максютова, Л.Б. Башалханова

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия*

*emaksyutova@irigs.irk.ru, ldm@irigs.irk.ru*

В работе показано, что наибольшая изменчивость температуры воздуха, характерная для холодного времени года, проявляется в резких межгодовых колебаниях температуры отопительного периода на фоне повышения его средней температуры. Это усложняет процессы планирования объемов топлива, их хранения и рационального потребления. Наблюдается увеличение частоты пожаров и средней площади одного пожара. Этому способствует природная пожароопасность лесного покрова, в основном представленного хвойными насаждениями, и значения пожарной опасности в лесу по условиям погоды от средних до чрезвычайных.

Для городов Байкальского региона очень остро стоит проблема качества атмосферного воздуха. На территории города Иркутска выделяются три типа микроклимата низин с отклонениями температуры воздуха в январе от 1,9 до -3,6 °С от базовой метеостанции «Иркутск, обсерватория». Застойные явления в этой зоне могут способствовать формированию интенсивного загрязнения атмосферы. Пространственные особенности формирования эколого-климатического состояния атмосферы в днищах долин Уды и Селенги, а также на склонах с множеством долин разной ориентации и выровненных поверхностей предопределяют высокий уровень загрязнения атмосферы в г. Улан-Удэ. Сочетание долинно-котловинного рельефа, с ее минимальной способностью к самоочищению, микроклиматических особенностей и уровня антропогенного воздействия диктует поиск путей изменения топливного баланса региона и улучшения качества топлива, в том числе и через развитие технологий, предусмотренных альтернативной «зеленой экономикой».

*Ключевые слова: изменчивость характеристик отопительного периода, лесные пожары и пожароопасность, микроклимат, качество атмосферного воздуха в городах*

The paper shows that the greatest variability in air temperature, characteristic of the cold season, is manifested in sharp interannual fluctuations in the temperature of the heating period against the background of an increase in its average temperature. This complicates the processes of planning fuel volumes, their storage and rational consumption. The fire frequency and the average area of a single fire are observed to be increasing. This is facilitated by the natural fire hazard of the forest cover, mainly represented by coniferous stands, and the values of fire hazard in the forest according to weather conditions from average to extreme.

The problem of atmospheric air quality is very acute for the cities of the Baikal region. On the territory of the city of Irkutsk, there are three types of microclimate of lowlands with air temperature deviations in January from 1.9 to -3.6 °C from the base weather station "Irkutsk Observatory". Stagnant phenomena in this zone can contribute to the formation of intense atmospheric pollution. Spatial features of the formation of the ecological and climatic state of the atmosphere in the bottoms of the valleys of the Uda and Selenga, as well as on the slopes with many valleys of different orientations and aligned surfaces determine the high level of atmospheric pollution in the city of Ulan-Ude. The combination of the valley-basin relief, with its minimal self-cleaning ability, microclimatic features and the level of anthropogenic impact dictates the search for ways to change the fuel balance of the region and improve fuel quality, including through the development of technologies provided for by the alternative "green economy".

*Keywords: variability of characteristics of the heating period, forest fires and fire hazard, microclimate, atmospheric air quality in cities*

Наблюдаемые колебания климата сопровождаются усилением его влияния на окружающую среду, хозяйственную деятельность и условия проживания населения. Учет региональных особенностей таких изменений и оценка климатических ресурсов могут способствовать снижению рисков негативного воздействия на жизнедеятельность населения.

Наиболее заселенная южная часть Байкальского региона характеризуется умеренным уровнем дискомфорта климата с незначительной пространственной вариацией продолжительности отопительного периода (238–241 дней) и умеренно теплым летом, с повышенной засушливостью в первой половине. Анализ колебаний характеристик отопительного периода за разные временные отрезки (до 1960 г.; 1961–1990 гг.; 1991–2017 гг. и 1960–2017 гг.) показал, что наибо-

лее заметное сокращение продолжительности отопительного периода (до 7 %) произошло в период с 1991 по 2017 гг. относительно многолетних данных до 1960 г.

Такой процесс сопровождался стабильным повышением его средней температуры и снижением расчетного индекса потребления топлива от 15 % в Чите до 19 % в Улан-Удэ и Иркутске (Максютова и др., 2019 а).

Установлено, что рост средней температуры в отопительный сезон связан с сокращением низкотемпературных периодов на территории Восточной Сибири (Bashalkhanova, Maksyutova, 2014). Вместе с тем выявлено, что резкие межгодовые колебания температуры воздуха на фоне современного потепления демонстрируют неоднозначность их влияния на хозяйственную

деятельность в Байкальском регионе. Так, расчетные значения межгодовых колебаний индекса потребления топлива за 1991–2017 гг. изменялись от 14 до 20 %, что сопоставимо с многолетними колебаниями (до 1960 г.). Наличие резких межгодовых колебаний индекса потребления топлива на фоне его стабильного снижения усложняют процессы планирования объемов топлива, их хранения и рационального потребления (Максютова и др., 2019 а).

Кроме того, резко континентальный климат территории и современные изменения климата оказывают влияние на развитие засушливости и пожароопасной ситуации в теплый период года. В Байкальском регионе за 2001–2018 гг. наблюдается тенденция увеличения показателей горимости и средней площади одного пожара. Развитию пожаров способствует очень высокая и высокая природная пожароопасность лесорастительного покрова, представленного преимущественно хвойными древостоями, и рост значений пожароопасности в лесу по условиям погоды от средней до чрезвычайной (Максютова и др., 2019 б).

Для городов Байкальского региона, расположенных преимущественно в котловинно-долинном рельефе, первостепенное значение обретает вопрос качества атмосферного воздуха, который определяется не только уровнем промышленного развития, но и природно-климатическими и микроклиматическими особенностями территории. Мощностные длительные сезонные и суточные инверсии, низкая повторяемость ветров, способных активизировать самоочищение атмосферы, орографическая расчлененность рельефа, ограниченное количество осадков способствуют высокому уровню загрязнения атмосферы. Основной объем выбросов загрязняющих веществ отмечается в течение продолжительного отопительного сезона одновременно с формированием и господствующим положением Сибирского антициклона (ноябрь – март), с которым связаны замедленные процессы рассеяния примесей в атмосфере.

Так, экологическое состояние атмосферного воздуха в г. Иркутске с низкой самоочищающей способностью атмосферы (Экологический атлас, 2015) определяется многолетним ежегодным превышением предельно допустимых концентраций (ПДК) по 5–6 опасным загрязняющим веществам, со стабильным присутствием взвешенных веществ (до 2,4 ПДК) и бенз[а]пирена (до 7,8 ПДК). На территории города выделена зона, которая включает три типа микроклимата низин с отклонениями температуры воздуха в январе от 1,9 до -3,6 °С от базовой метеостанции «Иркутск, обсерватория». Застойные явления в этой зоне могут способствовать формированию интенсивного загрязнения атмосферы (Максютова и др., 2021).

В г. Улан-Удэ, отличающимся крайне низкой способностью атмосферы к самоочищению, с 2010 по 2018 г. ежегодно отмечалось превышение ПДК по формальдегиду, взвешенным веществам, бенз(а)пирену, а до 2015 г. еще и по двуокиси азота (Государственный доклад). Наиболее резкий рост произошел для концентрации бенз(а)пирена - от 3 до 10,2 ПДК.

Пространственные особенности формирования эколого-климатического состояния атмосферы в днищах долин Уды и Селенги, а также на склонах с множеством долин разной ориентации и выровненных поверхностей предопределяют высокий уровень загрязнения атмосферы. Несмотря на более низкие, по сравнению с Иркутском, объемы валовых выбросов (более 2 раз) от стационарных источников качество атмосферного воздуха в обоих городах сопоставимо из-за различий ресурсов атмосферы к самоочищению.

Таким образом, наблюдаемое повышение средней температуры отопительного периода в Байкальском регионе сопровождается его резкими межгодовыми колебаниями, которые необходимо учитывать при разработке мер экономического и социального характера для улучшения условий жизнедеятельности населения.

Проблема качества атмосферного воздуха стоит очень остро и требует целого ряда решений путем развития технологий, предусмотренных альтернативной «зеленой экономикой», наиболее отвечающей природно-климатическим особенностям территории. Сочетание долино-котловинного рельефа с его минимальной способностью к самоочищению, микроклиматические особенности и уровень антропогенного воздействия определяет настоятельную необходимость снижения объемов выбросов загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников, что подразумевает изменение топливного баланса региона и улучшение качества топлива.

## Литература

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Республики Бурятия в 2018 году». Улан-Удэ: Минприроды Республики Бурятия. 2019. 242 с.; 2017. 232 с.; 2015. 175 с.; 2013. 208 с.; 2011. 308 с.
2. Максютова Е.В., Башалханова Л.Б., Корытный Л.М. Влияние современных температурных колебаний на хозяйственную деятельность населения в Байкальском регионе// ЭКО. 2019 (а). №7. С. 22–34. DOI: 10.30680/ЕСО0131-7652-2019-7-22-34
3. Максютова Е.В., Макаренко Е.Л., Силаев А.В. Активность лесных пожаров и пожароопасность в Байкальском регионе в современных условиях // География и природные ресурсы, 2019 (б). № 5. Специальный выпуск. С. 52–58. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2019-5(52-58)
4. Максютова Е. В., Башалханова Л. Б., Корытный Л. М., Сороковой А. А. Природно-климатические факторы в экологическом зонировании г. Иркутска // Теоретическая и прикладная экология, 2021. № 2. С. 55–59. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-2-055-059
5. Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН. 2015. 145 с.
6. Bashalkhanova L. B. and Maksyutova E. V. Influence of temperature variations during a cold period on the conditions of life of the population in East Siberia // Geography and Natural Resources. 2014. V. 35. №. 1. pp. 55–62.

## МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ДАТ ОБРАЗОВАНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ ПО РАЗНЫМ НАБОРАМ ДАННЫХ

А.А. Матюхина<sup>1</sup>, Н.Н. Воропай<sup>2,3</sup>, Ю.В. Мартынова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, matyukhina\_nastya08@mail.ru*

<sup>2</sup>*Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия, voropay\_nn@mail.ru*

<sup>3</sup>*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия, foxyj13@gmail.com*

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300158-9.

В статье представлен анализ дат образования снежного покрова (СП) и установления устойчивого снежного покрова (УСП) на территории Сибири по данным наблюдений метеорологических станций и спутниковым данным NOAA. Для дат рассчитаны статистические характеристики – среднее, максимум, минимум, тренд, значимость. Снежный покров способствует существенным изменениям радиационного и теплового баланса подстилающей поверхности по сравнению с открытой почвой, поэтому даты появления снежного покрова и образования устойчивого снежного покрова являются важными характеристиками состояния окружающей среды при современных изменениях климата.

*Ключевые слова:* снежный покров, Сибирь, устойчивый снежный покров, наземные, спутниковые данные.

The article presents an analysis of the dates of the formation of snow cover (SP) and the establishment of stable snow cover (SSS) in Siberia based on observations of meteorological stations and satellite data from NOAA. Statistical characteristics were calculated for dates – average, maximum, minimum, trend, significance. Snow cover contributes to significant changes in the radiation and heat balance of the underlying surface in comparison with the open soil; therefore, the dates of the appearance of snow cover and the formation of stable snow cover are important characteristics of the state of the environment under current climate changes.

*Keywords:* snow cover, Siberia, stable snow cover, ground, satellite data.

Снежный покров (СП) оказывает огромное влияние на климат, рельеф, гидрологические и почвообразовательные процессы, жизнь растений и животных. Снежный покров предохраняет почву от глубокого промерзания и сохраняет озимые посевы, поглощает азотистые соединения, удобряя тем самым почву, адсорбирует атмосферную пыль, охлаждает приземные слои воздуха. Малая теплопроводность и большая теплоемкость снега приводит к тому, что теплообмен через снежный покров замедлен, суточные колебания температуры быстро затухают с глубиной, проникая на глубину 25–35 см (Ландшафтно-экологический ..., 2009).

Сибирь – обширный географический регион на севере Азии, ограниченный с запада Уральскими горами, с востока – водораздельными хребтами, идущими вдоль Тихого океана, с севера – Северным Ледовитым океаном, с юга – государственной границей России (Поспелов, 2002). Для Сибири характерен континентальный и резко континентальный климат. Климат Восточной Сибири за исключением центральных и южных районов Красноярского края – резко континентальный. Западная часть Сибири – равнина, за исключением южных окраин, причем в более южной части она не отделяется от Европейской России какими-либо естественными преградами, поэтому и климат не отличается от климата Европейской России хоть сколько-нибудь резко; по мере движения на

восток он становится более континентальным; в более северной полосе, начиная от 62° с. ш. почти до Ледовитого океана, границей Европейской России и Западной Сибири служит Уральский хребет, поэтому здесь климат различается резко: с октября по март холодная и более ясная погода, снега выпадает меньше, поэтому он тает ранее, и ранее же наступает весеннее тепло; лето немного теплее на востоке.

При анализе многолетнего изменения дат образования СП за 1970–2020 гг. использованы ежедневные данные о степени покрытия окрестности снегом на 161 станции Сибири, находящихся в пределах 60–120° в.д. и 50–70° с.ш. Данные наблюдений были скачаны с базы данных Всемирного научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) (Булыгина и др., 2014). Также для исследования в работе были использованы данные спутниковых наблюдений NOAA о протяженности снежного покрова, полученные на основе еженедельных отчетов по Северному полушарию. Они были оцифрованы с карт снежного покрова на декартовую сетку, наложенную на полярную стереографическую проекцию. Данные имеют пространственное разрешение 190,6 км на широте 60°, обновляются ежемесячно, и охватывают период с 4 октября 1966 года по настоящее время, в рамках данной работы был рассмотрен период с 1970 года. В связи с тем, что используемые данные имеют недельное раз-

решение по времени, дата начала формирования СП определялась, как дата начала недели, где впервые за сезон было отмечено появление СП на территории (Estilow et al, 2015). Доступ к данным предоставляется в сетевой форме общих данных (netCDF) и архивировано Национальным центром климатических данных (NCDC) NOAA в рамках программы спутниковой записи климатических данных.

Для дат появления СП и установления устойчивого снежного покрова (УСП) по наземным и спутниковым данным был рассчитан тренд и его значимость, а также среднее, минимум, максимум, стандартное отклонение полученных трендов для всех станций и станций, на которых зафиксированы статистически значимые изменения.

В таблице 1 представлены статистические характеристики трендов дат появления СП и образования УСП по наземным и спутниковым данным. Зафиксировано 27 значимых трендов дат появления СП по наземным данным и 18 по спутниковым. Максимальное значение значимых трендов по наземным данным составило 7,88 дней/10 лет, по спутниковым – 6,15 дней/10 лет. Минимальное значение значимых трендов по наземным данным составило -5,98 дней/10 лет, по спутниковым -6,25 дней/10 лет. Среднее значение значимых трендов и по наземным, и по спутниковым данным отрицательное, и равно -0,79 и -2,64 соответ-

ственно. Стандартное отклонение значимых трендов равно 3,75 по наземным данным и 2,47 по спутниковым. Таким образом, значимых трендов дат появления СП по наземным данным преобладающее количество. Максимальный сдвиг появления СП на более ранние сроки зафиксирован по спутниковым данным на 6,25 дней/10 лет (ст. Верхняя Гутара) (рис. 1 а).

Для дат установления УСП отмечено 13 значимых трендов по наземным данным и 21 по спутниковым. Наибольшее положительное значение трендов по наземным данным составило 5,35 дней/10 лет на ст. Анטיפаюта, наибольшее отрицательное -9,79 дней/10 лет на ст. Турочак, (рис. 1 б), по спутниковым – все статистически значимые тренды отрицательные (от -8,3 на ст. Верхняя Гутара до -2 дня/10 лет). Среднее значение значимых трендов по наземным данным составило 0,56 по спутниковым -4,42.

Стандартное отклонение значимых трендов равно 4,9 по наземным данным и 1,6 по спутниковым. Таким образом, значимых трендов дат установления УСП по спутниковым данным преобладающее количество, но все значимые тренды по спутниковым данным отрицательны. Положительные значения тренда преобладает по наземным данным, то есть происходит сдвиг дат установления УСП на более поздние сроки. Согласно анализу спутниковых данных, происходит сдвиг установления УСП на более ранние сроки (табл. 1).

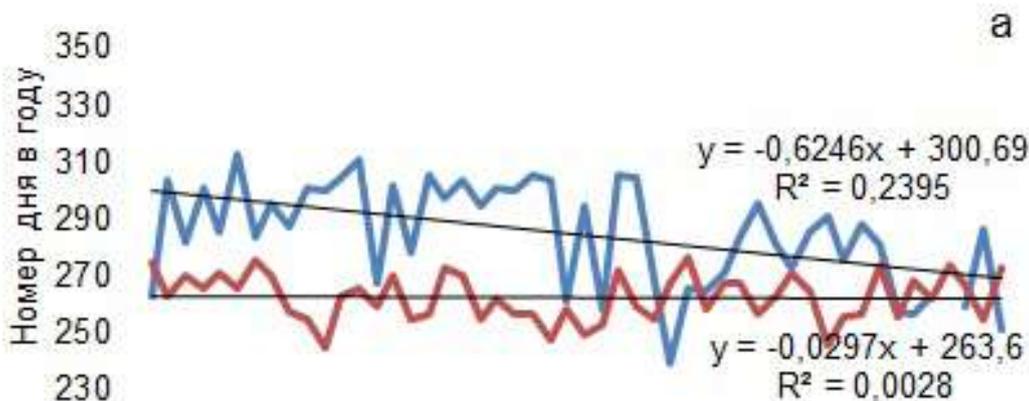


Рис. 1. Многолетние изменения дат появления СП на ст. Верхняя Гутара – а, многолетние изменения дат установления УСП на ст. Турочак – б

Таблица 1. Статистические характеристики трендов дат появления СП и образования УСП по наземным и спутниковым данным

Даты	Данные	Тренды	Кол-во станций	Среднее	Минимум	Максимум	Станд. откл.
Дата появления СП	Наземные данные	Все значения трендов	161	-0,01	-7,16	7,88	1,96
		Значимые тренды	27	-0,79	-5,98	7,88	3,75
	Спутниковые данные	Все значения трендов	161	-0,90	-6,25	6,15	1,47
		Значимые тренды	18	-2,64	-6,25	6,15	2,47

Дата установления УСП	Наземные данные	Все значения трендов	161	0,44	-9,79	7,30	2,47
		Значимые тренды	13	0,56	-9,79	5,35	4,90
	Спутниковые данные	Все значения трендов	161	-1,29	-8,30	1,57	1,71
		Значимые тренды	21	-4,42	-8,30	-2,00	1,60

### Литература

1. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. «Описание массива данных характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР» [электронный ресурс]. – <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>. (дата обращения 03.01.2021).
2. Ландшафтно-экологический образ зеленых островов ВАО. Снежный покров. М.: ДДЮТЭ «Родина», 2009.
3. Поспелов Е. М. Сибирь // Географические названия мира: Топонимический словарь: Ок. 5000 единиц / Отв. ред. Р. А. Агеева. 2-е изд., стереотип. М.: Русские словари, Астрель, АСТ, 2002.
4. Estilow T. W., Young A. H. and Robinson D. A. A long-term Northern Hemisphere snow cover extent data record for climate studies and monitoring // Earth System Science Data, 2015. V. 7, No 1. pp. 137–42.

УДК 502.53

## ОЦЕНКА ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ ТЕРРИТОРИИ В УСЛОВИЯХ АРИДНОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

О.В. Мезенцева<sup>1</sup>, А.А. Кусаинова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный университет, Омск, Россия, [mezolga@yandex.ru](mailto:mezolga@yandex.ru)

<sup>2</sup>Карагандинский технический университет, Караганда, Казахстан, [aimarh@mail.ru](mailto:aimarh@mail.ru)

В статье проведена оценка влагообеспеченности территории в условиях аридной зоны Северного Казахстана с использованием данных трех метеостанций: Балкашино, Есиль и Атбасар. Определена динамика и тенденция количества осадков за 30-летний период (1991–2020 гг.) в сравнении с предыдущим таким же периодом (1961–2020 гг.). Сделаны выводы о том, что в условиях недостаточности количества осадков и высокой температуры воздуха в летний период возрастает вероятность дефицита почвенной влаги и аридизации территории.

*Ключевые слова:* температура воздуха, количество осадков, вегетационный период засушливость, аридизация.

The article evaluates the moisture availability of the territory in the conditions of the arid zone of Northern Kazakhstan using data from three weather stations: Balkashino, Yesil and Atbasar. The dynamics and trend of precipitation over a 30-year period (1991–2020) are determined in comparison with the previous same period (1961–2020). Conclusions are drawn that in conditions of insufficient precipitation and high air temperature in summer, the probability of soil moisture deficiency and aridization of the territory increases.

*Keywords:* air temperature, precipitation, vegetation period aridity, aridization.

В современный период изменчивость климатических характеристик приобрела особую актуальность в связи с мировыми трендами глобальных изменений климата. Исследование повторяемости засушливых и влажных лет имеет практическое значение для нужд аграрного природопользования. Оценка влагообеспеченности территории в условиях аридной зоны Северного Казахстана направлено на определение тенденции изменчивости характеристик климата. Среди характеристик климата на засушливость территории большое воздействие оказывает изменчивость температурного режима и количества осадков вегетационного периода (май–август). По результатам исследования климатических характеристик Северного Казахстана

за последние три десятилетия (1991–2020 гг.) определен отрицательный тренд динамики среднемесячного количества осадков за июль, то есть его снижение (Мезенцева, 2021).

Для степной зоны Северного Казахстана характерно уменьшение годовых сумм атмосферных осадков по широте с севера на юг, что достоверно подтверждается анализом территориального распределения средних значений годовых сумм осадков.

Для проведения исследования использованы метеорологические данные метеостанций сельскохозяйственных районов Северного Казахстана – Балкашино, Есиль, Атбасар, расположенные в степной природной зоне (рис. 1) (Метеорологический ..., 2021).

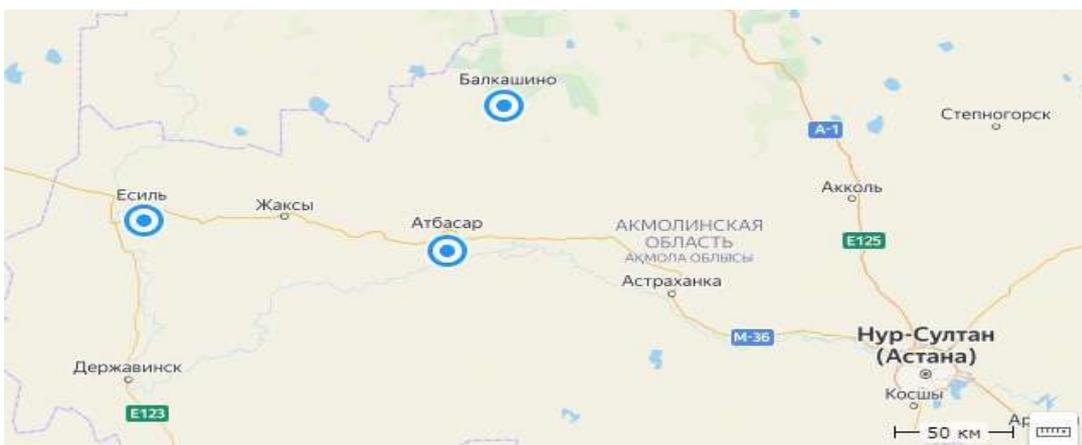


Рис.1. Месторасположение метеостанций на исследуемой территории

В работе будет представлен сравнительный анализ влагообеспеченности за последние 30 лет (1991–2020 гг.) со средними значениями количества осадков за предыдущие 30 лет (1961–1990 гг.) обычно принимаемыми в оценках тенденций изменения климата за норму.

По данным таблицы 1, за последние 30 лет по сравнению с предыдущими отмечается незначительное увеличение среднего значения количества осадков в вегетационном периоде: на 3–22 мм на метеостанции Балкашино, на 3–12 мм на метеостанции Есиль. А также наблюдается незначительное уменьшение осадков

мая и августа на 1–5 мм и незначительное увеличение на 3–10 мм на метеостанции Атбасар летом.

Анализируя данные рисунка 2, можно отметить, что количество осадков за июль за период 1991–2020 гг. в сравнении со средним значением (57 мм) за июль за 1961–1991 гг. на метеостанции Балкашино показала наибольшую амплитуду колебания в июле 1999 (153 мм), 2013 (192 мм), 2014 (192 мм) года. Эти годы являются наиболее увлажнёнными. Отмечается положительный тренд осадков.

Таблица 1. Сравнительная характеристика средних значений количества осадков за вегетационный период (май–август), мм

Метеостанция	Период (гг.)	Май	Июнь	Июль	Август
Балкашино	1961–1990	33	37	57	38
	1991–2020	55	40	74	46
Есиль	1961–1990	27	29	39	25
	1991–2020	32	35	51	28
Атбасар	1961–1990	32	31	46	31
	1991–2020	28	41	49	30

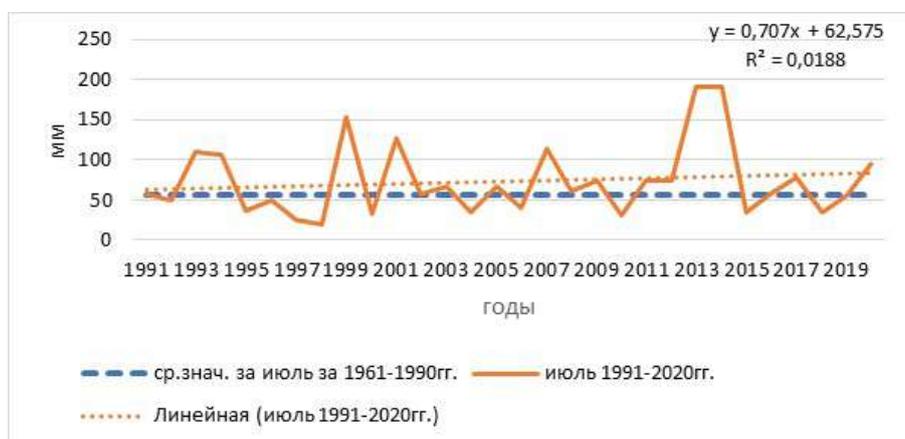


Рис. 2. Количество осадков за июль за период 1991–2020 гг. в сравнении со средним значением за июль 1961–1991 гг. на метеостанции Балкашино

На рисунке 3 отражено количество осадков за июль за период 1991–2020 гг. в сравнении со средним значением (39 мм) за июль за 1961–1991 гг. на метеостанции Есиль, которая показала наибольшую амплитуду колебания в июле 1999 (99 мм), 2001 (110 мм), 2003 (105 мм) года. Эти годы являются наиболее увлажнёнными на данной метеостанции. В 1998 и 2010 годах отмечаются засушливые условия с количеством осадков 4 и 9 мм соответственно. Отмечается тренд в сторону уменьшения осадков.

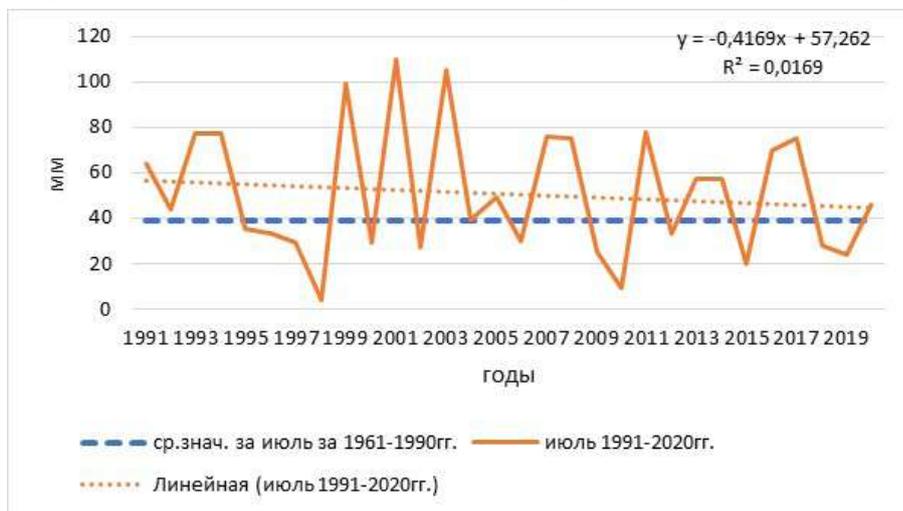


Рис. 3. Количество осадков за июль за период 1991–2020 гг. в сравнении со средним значением за июль 1961–1991 гг. на метеостанции Есиль

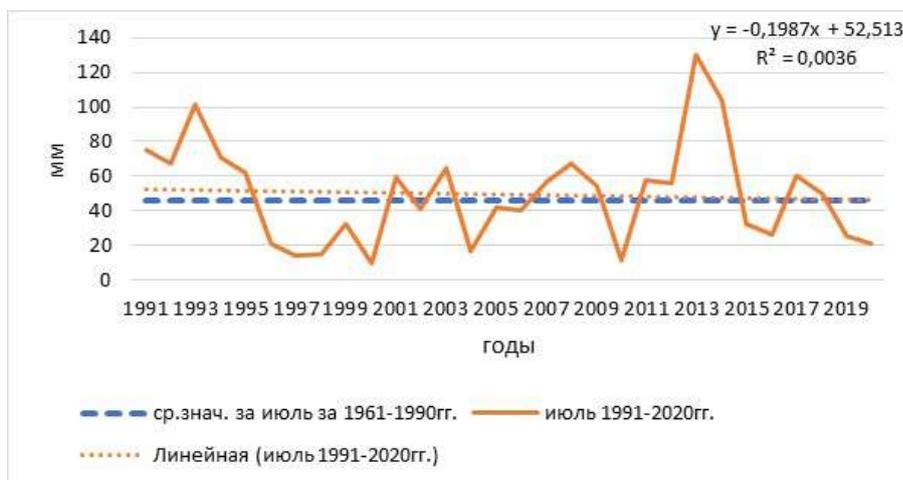


Рис. 4. Количество осадков за июль за период 1991–2020 гг. в сравнении со средним значением за июль 1961–1991 гг. на метеостанции Атбасар

Изменчивость температурного режима также влияет на состояние влагообеспеченности территории. В таблице 2 приведены данные средних значений температуры воздуха за вегетационный период (май–август).

Таблица 2. Сравнительная характеристика средних значений температуры воздуха за вегетационный период (май–август), °С

Метеостанция	Период (гг.)	Май	Июнь	Июль	Август
Балкашино	1961–1990	12	17	19	16
	1991–2020	12	17	18	16
Есиль	1961–1990	14	19	21	18
	1991–2020	15	20	21	19
Атбасар	1961–1990	13	19	20	17
	1991–2020	14	19	20	18

За 30-летний период (1991–2020 гг.) по сравнению с предыдущим таким же периодом рост температуры воздуха на 1°C отмечается на метеостанциях Есиль, Атбасар, а в Балкашино в июле определяется снижение на 1°C.

Среди характеристик климата огромное влияние оказывает на засушливость территории колебания температуры воздуха и количества осадков весенне-летнего периода. Климатические тенденции считаются главным фактором, приводящим к аридизации и опустыниванию территории. Резкие перепады температуры и влажности в летний период способствуют увеличению частоты проявления природных катаклизмов и превращению умеренного климата в экстремальный, что является предпосылками аридизации территории (Мезенцева, 2021).

Таким образом, из проведенного исследования сделаны следующие выводы:

- на метеостанции Балкашино за последний 30-летний период отмечаются значительные колебания количества осадков за июль в преимущественно влажные годы. Линия тренда показала тенденция роста осадков;
- на метеостанции Есиль за последний 30-летний период отмечаются как влажные, так и засушливые годы. Линия тренда показала тенденцию снижения осадков;
- на метеостанции Атбасар за последний 30-летний период отмечаются преимущественно засушли-

вые годы. Линия тренда показала тенденцию снижения осадков;

- в условиях недостаточности количества осадков и высокой температуры воздуха в летний период возрастает вероятность дефицита почвенной влаги и аридизации территории.

### Литература

1. Мезенцева О.В., Кусаинова А.А. Оценка многолетней динамики климатических характеристик, способствующих аридизации степной зоны Северного Казахстана // Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции «Климатические изменения и сезонная динамика ландшафтов». Екатеринбург, 2021. С. 75–80.
2. Мезенцева О.В., Кусаинова А.А., Рахимберлин А.Н. Пространственно-временные закономерности изменчивости тепло- и воднобалансовых характеристик Центрального Казахстана // Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие». Материалы научных конференций. 2019. С. 106–109.
3. Метеорологический информационный сайт «Казгидромет» [Электронный ресурс] / Республиканское Государственное Предприятие «Казгидромет». Электрон. дан. Нур-Султан, 2021. URL: <http://www.kazhydromet.kz> (дата обращения 20.09.2021).

УДК 551.50

## РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ОСАДКОВ В МАВРИТАНИИ

М. Моктар

*Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия,  
moctar.md@outlook.fr*

Представлены результаты исследования режима осадков Мавритании, проведена адаптация гидродинамической мезомасштабной модели WRF-ARW к региону исследования и к решаемой задаче. Создан банк данных об осадках. Проведена верификация модели для проверки соответствия гидродинамического прогноза осадков данной моделью фактической погоде по данным TRMM и данным наземных измерений. Разработаны рекомендации по гидродинамическому прогнозу осадков для Мавритании.

*Ключевые слова: осадки Мавритании, прогноз осадков, конвекция, параметризация, WRF-ARW, верификация*

In this paper, are presented the results of the study of the precipitation regime in Mauritania, the hydrodynamic mesoscale model WRF-ARW is studied and its adaptation to the region of study and to the problem being solved is carried out. For the purpose of the study, a precipitation data bank was created. The choice of the most suitable parameterization scheme has been carried out. The model was verified to check the conformity of the hydrodynamic forecast of precipitation with this model to the observed weather. Recommendations for hydrodynamic forecasting of precipitation for Mauritania have been made.

*Keywords: Numerical methods, Mauritanian precipitations, parameterization, WRF-ARW, verification*

### Введение

Поле осадков в Мавритании крайне неоднородно по времени - бывают годы с большим количеством осадков, как и годы без них. Кроме того, осадки в данном регионе имеют сезонный характер и в основном выпадают летом.

Редкость сети метеорологических станций затрудняет прогноз и становится необходимым поиск альтернативы. Такой альтернативой может быть гидродинамический прогноз с использованием в качестве краевых и начальных условий данных глобального модельного анализа.

Гидродинамический прогноз осадков также связан с прогнозом конвективных облаков, что необходимо для улучшения представления вертикальных профилей температуры и влажности (Tiedtke, 1989).

В гидродинамических моделях конвективные процессы, как правило, являются подсеточными и представить результаты их воздействия возможно только средствами параметризации. По этой причине выбор наиболее эффективной схемы параметризации для данного региона позволит улучшить прогноз осадков.

### Материалы и методы

Было проведено предварительное климатологическое исследование, которое показало, что в 1998 и 2015 годах в Мавритании выпало большое количество осадков и таким образом, эти годы являются наиболее благоприятными для исследования, но в итоге выбор пал на 2015 год, поскольку база данных анализа NCEP/NCAR, которая использовалась для постановки начальных и граничных условий, не содержит данные 1998 год.

Область, по которой строилась модель, соответствует континентальной Мавритании и её территориальным водам и охватывает регион между координатами  $14.0510^\circ \leq \varphi \leq 27.4390^\circ$ ;  $-27.1430^\circ \leq \lambda \leq -4.1120^\circ$ . Использовалась меркаторская проекция, как наиболее подходящая в данной географической области. Сетка расшатанная по типу C в классификации Аракава (Белов, 1989). Шаг сетки по горизонтали 30 км, по времени 60 секунд. Применялась также вложенная сетка, шаг которой составил 10 км по пространству и 20 секунд по времени. Данная телескопизация была совершена с соблюдением условия Фридрихса-Куранта-Леви. По вертикали использовалась гибридная  $\sigma$ -р система координат (43 уровня). Заблаговременность прогноза 24 часа.

В данном исследовании применялись схемы параметризации, рекомендованные для Ирана, поскольку данный регион подобен Мавритании по своим климатическим особенностям (Zeayen et al, 2017): для планетарного пограничного слоя схема Mellor-Yamada-Janjic (Janic et al, 1994; Meisinger et al, 1993), улучшенная схема Tiedtke (Zhang et al, 2011) для конвекции и схема WSM3 (Hong et al, 2004) для микрофизики.

В целом был дан 31 прогноз для августа 2015 года, поскольку этот месяц находится в самом пике влажного сезона тропической зоны северного полушария. Краевые и начальные условия заданы в узлах равномерной сетки с шагом  $0,25^\circ$  [URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/>].

Для верификации результатов прогнозов были использованы данные Тропической миссии по измерению количества осадков TRMM и данные четырёх наземных станций, полученных из базы UKmetoffice [URL: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.3/>].

Для этих данных были рассчитаны средние ошибки прогнозов и средние абсолютные ошибки. Кроме того, была проведена нормировка данных статистик по системе уравнений (1):

$$\begin{cases} O_{norm} = \frac{O_i - O_{min}}{O_{max} - O_{min}} \\ AO_{norm} = \frac{AO_i - AO_{min}}{AO_{max} - AO_{min}} \end{cases}, \quad (1)$$

и был рассчитан комплексный показатель качества прогноза по методике Gbode et al (Gbode et al, 2019) по уравнению (2)

$$КП = (1 - |O_{norm}|) + (1 - AO_{norm}), \quad (2)$$

где

O — средняя ошибка прогноза,

АО — средняя абсолютная ошибка прогноза, индекс norm указывает на нормировку.

Результаты исследования

Полученные данные спутникового продукта осадков (СПО) TRMM содержат множество пропусков. По этой причине, сравнение было выполнено только в узлах с данными. Результаты сравнения показали, что прогностическое количество осадков в основном занижено, поскольку большая часть ошибок по отношению к СПО TRMM отрицательны.

Верификация по данным наземных наблюдений проводилась в фиксированной точке пространства в различные моменты времени. Анализ результатов показал, что большая часть ошибок отрицательна, то есть результаты верификации согласуются с данными СПО TRMM и количество осадков занижается. Единственным исключением данной закономерности является случай со станцией Киффа, для которой прогноз оказался в основном завышенным. Более детальное исследование завышений на станции Киффа показал, что это единственная станция, находящаяся на юге страны, где активность внутритропической зоны конвергенции максимальна.

Был также исследован временной ряд средних ошибок прогноза по отношению к СПО TRMM. Было выявлено большое завышение количества осадков 19 августа 2015 года. Данное обстоятельство объясняется тем, что в этот день спутниковый снимок охватил часть континентальной области на юге страны. Это ещё раз подтверждает тот факт, что на юге, где осадки связаны с ВЗК, прогностическое количество осадков завышается.

Поскольку моделью прогнозируются отдельно осадки конвективных и неконвективных облаков, было проведено исследование различных типов осадков и их сумма. Были рассчитаны средние абсолютные ошибки и средние ошибки по отношению к данным СПО TRMM.

Результаты данного сопоставления показали, что больше всего соответствуют фактическим данным прогноз суммы обоих видов осадков и оправдываемость прогноза количества осадков составляет 71 %

## Выводы

Произведено сравнение прогнозов осадков со СПО TRMM и с данными наземных станций, которое показало занижение прогноза, причём занижение различно для верификации по разным данным. Поскольку данные наземных наблюдений более достоверные, они предпочтительней для сравнения, но в связи с их малым количеством (четыре станции), становится явным преимущество сопоставления со СПО.

Показано, что количество всех видов прогнозируемых осадков занижено, по сравнению со всеми данными, но, в редких случаях, сильно завышены прогнозы неконвективных форм осадков.

Поскольку большая часть Мавритании находится в пустыне Сахара, прогноз осадков является важной и достаточно трудной задачей из-за редкости сети оперативных наблюдений с одной стороны и недостаточной изученностью синоптических и других атмосферных процессов с другой стороны. Кроме того, наличие пропусков в рядах наблюдений также усложняет задачу.

Анализ результатов исследования позволяет дать следующие рекомендации касательно гидродинамического прогноза осадков для Мавритании:

Для улучшения прогноза, необходимо, увеличение количества наземных данных для сравнения, как минимум временно, организацией экспедиций по измерениям.

Прогноз осадков лучше давать не для всей области охвата модели, а только для тех точек для которых прогноз и факт больше всего связаны.

Прогноз необходимо давать по суммарному количеству осадков.

## Литература

1. Tiedtke, M., 1989: A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale

Models. Mon. Wea. Rev., 117, 1779–1800, [https://doi.org/10.1175/15200493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/15200493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2)

2. Белов Н.П. Численные методы прогноза погоды: учебник/ Н.П. Белов, Е.П. Борисенков, Б.Д. Панин; ред. В. П. Садоков; Гидрометеиздат. 1-е изд. Л.; 1989. 379(8)с
3. Zeyaen, Sadegh&Fattahi, Ebrahim&Ranjbar, Abbas&Azadi, M. &Vazifedoust, M..(2017). Evaluating the Effect of Physics Schemes in WRF Simulations of Summer Rainfall in North West Iran. Climate. 5. 48. 10.3390/cli5030048.
4. Janjic, Zavisla I., 1994: The Step–Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. Mon. Wea. Rev., 122, 927–945.
5. Mesinger, F., 1993: Forecasting upper tropospheric turbulence within the framework of the Mellor–Yamada 2.5 closure. Res. Activ. in Atmos. and Ocean. Mod., WMO, Geneva, CAS/JSC WGNE Rep. No. 18, 4.28–4.29.
6. Zhang, C., Y. Wang, and K. Hamilton, 2011: Improved Representation of Boundary Layer Clouds over the Southeast Pacific in ARW–WRF Using a Modified Tiedtke Cumulus Parameterization Scheme. Mon. Wea. Rev., 139, 3489–3513, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-10-05091.1>
7. Hong, Song–You, Jimmy Dudhia, and Shu–Hua Chen, 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. Mon. Wea. Rev., 132, 103–120.
8. Gbode, I.E., Dudhia, J., Ogunjobi, K.O. et al. Sensitivity of different physics schemes in the WRF model during a West African monsoon regime. TheorApplClimatol 136, 733–751 (2019).<https://doi.org/10.1007/s00704-018-2538-x>

УДК 551.583:551.510

## ИЗМЕНЧИВОСТЬ СИНОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КАК ИНДИКАТОР ФЛУКТУАЦИЙ КЛИМАТА

С.В. Морозова, Е.А. Полянская, М.А. Алимпиева

*ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский университет  
имени Н.Г. Чернышевского», Саратов, Россия,  
swetwl@yandex.ru*

Рассматривается повторяемость синоптических процессов в Нижнем Поволжье в два естественных климатических периода состояния земной климатической системы – стабилизацию и вторую волну глобального потепления. Отмечаются сезонные различия повторяемости различных типов синоптических процессов над Нижней Волгой. Указывается на возрастание роли летних сезонов в наблюдаемом росте температур воздуха.

*Ключевые слова: синоптические процессы, климатическая изменчивость, региональный климат*

The recurrence of synoptic processes in the Lower Volga region in two natural climatic periods of the state of the earth's climate system is considered - stabilization and the second wave of global warming. Seasonal differences in the frequency of occurrence of various types of synoptic processes over the Lower Volga are noted. An increase in the role of summer seasons in the observed increase in air temperatures is indicated.

*Keywords: synoptic processes, climatic variability, regional climate*

Климатические изменения, наблюдающиеся на земном шаре, проявляются по типу разгоняющегося потепления, о чем свидетельствует прогрессивный рост приповерхностной температуры воздуха. Однако, климатические изменения по-разному проявляются в различных регионах. Наибольшая погодно-климатическая изменчивость характерна для Атлантико-Евразийского сектора полушария (Морозова, 2012, 2015). Погодно-климатическая неустойчивость формируется под влиянием развивающихся над регионом синоптических процессов. Целью настоящей работы является исследование повторяемости различных типов синоптических процессов в районе Средней и Нижней Волги с целью перспективной оценки состояния регионального климата. Укажем, что исследование повторяемости различных типов синоптических процессов проводилось в два естественных климатических периода состояния земной климатической системы (ЗКС). Термин естественный климатический период предложен С.В. Морозовой (Морозова 2015, Морозова 2019, Morozova et al., 2018, Morozova et al., 2019).

Исследование синоптических процессов проводилось с использованием типизации В.Л.Архангельского – Е.А.Полянской, разработанной для Нижнего Повол-

жья (Архангельский, 1968; Полянская, 1986). Согласно этой типизации выделено семь основных типов синоптических процессов:

- I. Циклоническая деятельность на арктическом фронте.
- II. Воздействие арктического антициклона.
- III. Воздействие зимнего азиатского антициклона.
- IV. Воздействие субтропического антициклона.
- V. Малоградиентные поля повышенного и пониженного давления.
- VI. Циклоническая деятельность на полярном фронте.
- VII. Деформационное поле.

Поскольку одной из особенностей потепления является его сезонность, рассмотрим повторяемость синпроцессов в центральные месяцы основных сезонов года – в январе и июле. В табл. 1 представлена повторяемость различных типов синоптических процессов для этих месяцев в два естественных климатических периода – период стабилизации (СТ) и вторую волну глобального потепления (ВТВ).

Как видно из табл. 1, имеется существенная разница в повторяемости синоптических процессов в два естественных климатических периода.

Таблица 1. Повторяемость различных типов синоптических процессов

Тип процесса	Период	Пункт			
		Самара	Саратов	Волгоград	Астрахань
январь					
I	СТ	25.1	24.5	19.3	15.5
	ВТВ	30.5	29.6	19.9	13.8
II	СТ	15.9	15.3	11.2	13.5
	ВТВ	12.3	10.2	14.4	12.6
III	СТ	22.3	20.6	12.9	18.8
	ВТВ	22.2	16.6	17.5	19.7
IV	СТ	2.7	3.1	8.7	5.9
	ВТВ	0.6	2.3	5.0	2.8
V	СТ	4.4	5.6	4.8	5.0
	ВТВ	10.6	11.9	13.9	21.0
VI	СТ	14.8	16.8	24.8	21.8
	ВТВ	8.6	13.1	12.4	11.5
VII	СТ	1.8	4.5	4.5	3.5
	ВТВ	5.3	4.4	4.7	4.9
июль					
I	СТ	14.4	11.4	7.6	5.0
	ВТВ	18.6	22.0	14.2	9.2
II	СТ	15.3	13.5	11.2	10.3
	ВТВ	30.0	26.8	27.3	26.2
IV	СТ	16.9	20.0	26.5	26.2
	ВТВ	10.7	10.5	14.1	17.8
V	СТ	11.4	11.9	11.4	13.1
	ВТВ	20.6	18.0	22.9	28.7
VI	СТ	29.5	30.8	34.2	30.0
	ВТВ	9.0	9.5	11.5	7.5
VII	СТ	1.2	4.4	3.9	1.5
	ВТВ	4.8	3.3	3.9	4.9

Во вторую волну глобального потепления над Средней и Нижней Волгой возросла повторяемость циклонов, развитых на арктическом фронте. Однако, отметим, что ветка арктического фронта зимой не опускается южнее Волгограда, а в Астрахани во вторую волну глобального потепления арктическофронтальных циклонов даже стало меньше, чем в период стабилизации. Климатологическим следствием усиления циклоничности на арктическом фронте зимой на Средней и частично на Нижней Волге является потепление зимних сезонов. Рост температур именно холодной части года является характерной особенностью первой фазы второй волны глобального потепления. При этом во вторую волну глобального потепления зимой снижается повторяемость арктических антициклонов, формирующих аномально холодную, морозную погоду в регионе и обеспечивающих подпитку западной периферии зимнего азиатского антициклона за счет вхождения в нее свежих порций холодного воздуха.

Однако же летом (табл. 1) во всех исследуемых пунктах наблюдается почти двукратное увеличение вторжений антициклонов из Арктики во вторую волну глобального потепления по сравнению с периодом стабилизации. Интенсивный прогрев сухого арктического воздуха в условиях Средней и Нижней Волги приводит к его быстрой трансформации в местный тропический (Архангельский, 1968; Полянская 1986). Летом в результате вторжения сухого воздуха из Арктического бассейна формируются особо интенсивные и продолжительные волны тепла (Морозова, 2013). Важным климатологическим следствием этого является увеличение частоты засушливых явлений в регионе летом.

Присутствие в регионе западной периферии зимнего Азиатского антициклона в два климатических периода весьма своеобразно. В Самаре частота воздействия на регион III типа процесса в два климатических периода не изменяется. В Саратове повторяемость западной периферии зимнего Азиатского антициклона во вторую волну глобального потепления по сравнению с периодом стабилизации существенно снижается, в Волгограде и Астрахани – возрастает. Укажем, что по исследованиям Лапиной, Маргазиновой (1971) для западной периферии зимнего Азиатского антициклона не существует преобладающего типа погоды. Морозная погода устанавливается только тогда, когда периферия Сибирского максимума давления пополняется свежими арктическими ядрами.

Влияние субтропического антициклона (IV тип) – чисто летний процесс, поэтому его повторяемость в регионе зимой минимальна. Однако во вторую волну глобального потепления по сравнению с периодом стабилизации его воздействие на Среднюю и Нижнюю Волгу стало еще меньше, примерно в два с половиной раза. Отметим, что и летом в период второй волны восточные отроги Азорского максимума гораздо реже распространялись на Поволжье, чем раньше, в период стабилизации.

Укажем, что и зимой, и летом в Поволжье во вторую волну глобального потепления по сравнению с

предыдущим естественным климатическим периодом стали намного чаще наблюдаться малоградиентные поля повышенного и пониженного давления (V тип процесса).

В отличие от показывающих рост повторяемости во вторую волну глобального потепления арктическофронтальных циклонов, полярнофронтальные циклоны демонстрируют снижение своей повторяемости в этот период, причем это характерно и для зимы, и для лета. Отметим, что летом увлажнение территории Средней и Нижней Волги происходило преимущественно в результате циклонической деятельности на полярном фронте. В связи с более глубоким проникновением на Восточно-Европейскую равнину антициклонов из Арктики, к югу смещается ветка полярного фронта, обеспечивая дождливую погоду на юге ЕЧР. Как пример можно привести летние процессы 2021 года на Кубани, в Крыму (циклоны, вызывающие сильные ливни, и как следствие, наводнения).

Укажем, что характерной циркуляционной особенностью Нижнего Поволжья является присутствие над ним климатически устойчивого деформационного поля (Полянская, 1986). Изменения частоты воздействия этого типа процесса в два климатических периода весьма хаотично. Так в Самаре и Астрахани его повторяемость во вторую волну глобального потепления возрастает, причем и зимой, и летом. В Саратове зимой повторяемость деформационных полей от периода к периоду не изменяется, а летом уменьшается от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления. В Волгограде частота присутствия деформационного поля не изменяется в два климатических периода, причем это характерно и для зимы, и для лета.

Выявленные особенности нашли отражение в характере барического поля средней тропосферы. Как пример на рис. 1 представим барическое поле средней тропосферы в период стабилизации летом.

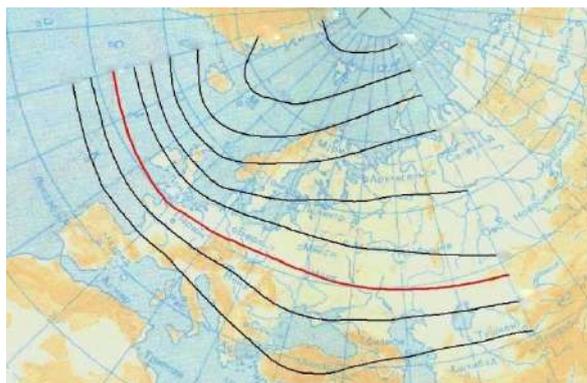


Рис. 1. Барическое поле на среднем уровне тропосферы в период стабилизации летом (июль).

Красным цветом выделена осевая изогипса

На рис. видно, что южная часть ЕТР, Поволжье летом расположено в области высотной барической ложбины. Причем Поволжье находится в передней части ложбины, являющейся областью активного циклогенеза.

В отличие от предыдущего, во вторую волну глобального потепления летом над югом ЕЧР и Поволжьем расположен климатический барический гребень, отражающий процессы стационарирования над регионам антициклонов, а именно процессы блокирования.

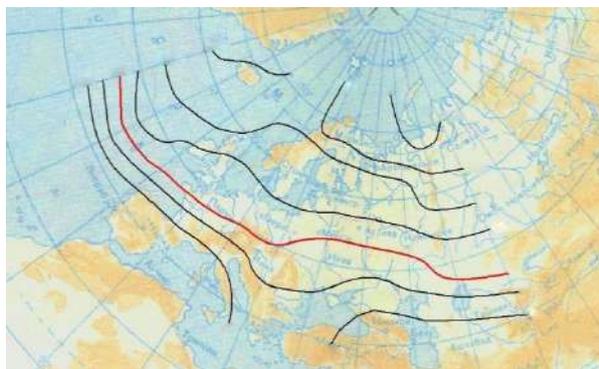


Рис. 2. Барическое поле на среднем уровне тропосферы во вторую волну глобального потепления летом (июль). Красным цветом выделена осевая изогипса

При сохранении выявленных тенденций можно ожидать увеличение повторяемости засушливых условий в Поволжье летом. Повышение температур летних сезонов может увеличить вклад летних процессов в наблюдающийся рост средних годовых температур. Укажем, что рост средних годовых температур обычно происходит при повышении температур зимних сезонов. Возрастание вклада летних температур является процессом, не характерным для земной климатической системы, по крайней мере, в эпоху регулярных инструментальных наблюдений. Считаем, что вывод о повышении вклада температур летних сезонов в глобальное потепление имеет важное значение для дальнейшего развития теории климата.

#### Литература

1. Архангельский В.Л. Региональная синоптика Нижнего Поволжья. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1968. 208 с.
2. Лапина С.Н., Мартазинова В.Ф. Аэросиноптическая характеристика западного отрога зимнего азиатского антициклона над Нижним Поволжьем // Вопросы климата и погоды Нижнего Поволжья. Саратов.: Изд-во Саратов. ун-та, 1971. Вып. 7. С. 88–95.
3. Морозова С.В. Характер циркуляции атмосферы в атлантико-евразийском секторе полушария как индикатор климатических изменений на Русской равнине (на примере зимы) // Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Том 12. Серия Науки о Земле. 2012. Вып. 2. С. 34–37.
4. Морозова С.В. Физико-статистический анализ современных климатических изменений в Атлантико-Евразийском секторе зимой (на примере января) // Труды ГМЦ. 2015. Вып. 358. С. 88–98.
5. Морозова С.В. Исследование циркуляции атмосферы в Атлантико-Евразийском секторе полушария на фоне настоящих климатических изменений летом (на примере июля) // Изв. Саратов. ун-та. Новая серия. Серия Науки о Земле. Том 15. 2015. Вып. 1. С. 21–24.
6. Морозова С.В. Исследование синоптических процессов методом эталонов. Саратов. Изд-во СГУ. 2013. 164 с.
7. Морозова С.В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных синоптических процессах. Саратов. Изд-во СГУ. 2019. 132 с.
8. Полянская Е.А. Синоптические процессы и явления погоды в Нижнем Поволжье. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. 1986. 208 с.
9. Morozova SV, Polyanskaya EA, Ivanova GF, Levitskaya NG, Denisov KE, Molchanova NP Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the background of global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental (EES). Volume 107. 2018.
10. Morozova SV, Polyanskaya EA, Kononova NP, Molchanova NP and Solodovnikov AP Peculiarities of the global climate tendencies in the south-east Russian plains // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 381. 2019. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/381/1>.

## О РОЛИ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В НАСТОЯЩИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ

С.В. Морозова, Е.А. Полянская, М.А. Алимбиева

*ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет  
имени Н.Г. Чернышевского», Саратов, Россия, swetwl@yandex.ru, kafmeteo@mail.ru*

Рассматривается изменение площади и интенсивности планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) в два естественных климатических периода состояния земной климатической системы – период стабилизации и вторую волну глобального потепления. Получено, что от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления площадь ПВФЗ расширяется, а ее интенсивность уменьшается. При замедлении потепления в начале нулевых годов XXI века площадь ПВФЗ начала сокращаться, а ее интенсивность – возрастать. Это позволили говорить о связи между аномалиями средней полушарной температуры воздуха и изменением состояния глобального объекта циркуляции. На основании эмпирической зависимости можно предположить существование отрицательной обратной связи между изменением средней полушарной температуры воздуха и динамикой ПВФЗ. Показано возможное использование найденной обратной связи для прогнозирования климатических флуктуаций на конечных масштабах времени.

*Ключевые слова:* земная климатическая система, обратные связи, общая циркуляция атмосферы, глобальное потепление, объекты циркуляции

The change in the area and intensity of the planetary high-altitude frontal zone (PVFZ) in two natural climatic periods of the state of the earth's climate system is considered - the stabilization period and the second wave of global warming. It was found that from the period of stabilization to the second wave of global warming, the PVFZ area expands, and its intensity decreases. With the slowing down of warming at the beginning of the 2000s, the area of the PVFZ began to decrease, and its intensity began to increase. This made it possible to speak about the connection between the anomalies of the average hemispheric air temperature and the change in the state of the global circulation object. Based on the empirical dependence, it can be assumed that there is a negative feedback between the change in the average hemispheric air temperature and the dynamics of the PVFP. Possible use of the found feedback for predicting climatic fluctuations on finite time scales is shown.

*Keywords:* terrestrial climate system, feedbacks, general atmospheric circulation, global warming, circulation objects

Вопросы, касающиеся климата и его изменений, актуальны не только для научного мира, но всего человечества. Наблюдающаяся погодная неустойчивость и климатическая нестабильность ведет к возрастанию климатических рисков во многих секторах экономики. В связи стратегические перспективы развития экономики обязательно должны учитывать наблюдающиеся климатические изменения и будущие тенденции изменения земного климата.

В настоящее время основным приемом, позволяющим рассчитывать будущие характеристики земного климата, является гидродинамическое моделирование. По данным Оценочных докладов МГЭИК (IPCC, 2007, 2013, 2021) продолжится неуклонный рост температуры воздуха. Однако, существенным недостатком гидродинамического моделирования является то, что в моделях очень трудно воспроизвести циклические колебания, которые, в первую очередь, обусловлены природными процессами.

Фактический рост температуры воздуха происходит неравномерно. Морозовой С.В. (Морозова, 2019, Morigozova et al., 2018; 2019) предложено промежутки с однонаправленной тенденцией изменения температуры воздуха называть естественными климатическими периодами состояния земной климатической системы (ЗКС), хотя, в последнее время, безусловно, добавилась антропогенная составляющая. Это малый

ледниковый период в Европе, первая волна глобального потепления, период стабилизации, вторая волна глобального потепления. Считаем, что для выявления долговременной динамики какой либо гидрометеорологической величины или характеристики, циркуляционного объекта, и пр, целесообразно делать привязку не к временным промежуткам одинаковой продолжительности (десятилетия, тридцатилетия, и т.п.), а к естественным климатическим периодам.

В настоящей статье рассматривалось состояние объекта циркуляции глобального масштаба – планетарной высотной фронтальной зоны - в два естественных климатических периода – период стабилизации и во вторую волну глобального потепления. Планетарная высотная фронтальная зона – трехмерный структурный элемент общей циркуляции атмосферы (ОЦА), представляющий собой переходную область между высокими холодными циклонами и высокими теплыми антициклонами, и разделяющий тем самым области отрицательных и положительных аномалий температур. Именно ее динамика определяет погодно-климатическую неустойчивость в умеренных широтах. Рассматривалось сечение ПВФЗ на среднем энергетическом уровне тропосферы – изобарической поверхности АТ- 500 гПа.

Для анализа выбраны две характеристики ПВФЗ – ее площадь и интенсивность, Отметим, что выбран

ные характеристики не обнаруживают между собой очевидной линейной зависимости. Авторская оценка коэффициента корреляции между этими величинами составила  $0,111 \pm 0,053$ . Под площадью ПВФЗ понималась площадь околополюсного пространства, ограниченная с юга (для Северного полушария) осевой изогипсой (Кантер, 1965; Байдал, Ханжина, 1986). Осевая изогипса для каждого месяца определялась согласно методике Ю.Б.Храброва (Храбров, 1957). В качестве интенсивности планетарной высотной фронтальной зоны принята величина скорости геострофического ветра  $V_g$ .

$$V_g = \frac{9,8}{l} \frac{\partial H}{\partial n}$$

где  $l$  – параметр Кориолиса ( $l=2\omega \sin \varphi$ ),  
 $\omega$  – угловая скорость вращения Земли,  
 $\varphi$  – широта расположения осевой изогипсы,  
 $H$  – высота геопотенциала изобарической поверхности 500 гПа,

$\frac{\partial H}{\partial n}$  – производная геопотенциальной высоты по направлению, перпендикулярному касательной к изогипсе.

Характеристики ПВФЗ взяты из электронного приложения к Справочной монографии (Неушкин и др., 2013).

В табл. 1 представлены изменения площади ПВФЗ в два рассматриваемых естественных климатических периода.

Таблица 1. Изменение площади ПВФЗ в два естественных климатических периода

Период (гг.)	Значение площади ПВФЗ (млн км <sup>2</sup> )		
	среднегодовые	январь	июль
1)1949-1974 (стабилизация)	56,97	62,44	56,15
2) 1975-2010 (вторая волна глобального потепления)	57,77 увеличение на 1,5 %	64,19 увеличение на 3 %	59,58 увеличение на 6 %

Анализ табл.1 позволил заключить, что при повышении средней глобальной температуры воздуха происходит расширение площади ПВФЗ. Если сравнить обнаруженное климатическое изменение площади планетарной высотной фронтальной зоны с ее сезонной динамикой, то можно отметить, что климатическое изменение площади ПВФЗ противоположно ее сезонному изменению: от зимы к лету площадь ПВФЗ сокращается. Выявленная климатическая динамика ПВФЗ представляется необычной и весьма интересной. Отметим, что вышеописанное изменение площади ПВФЗ характерно для всех месяцев года, за исключением апреля и октября (Морозова, 2019).

Рассмотрим, как ведет себя другая выбранная характеристика планетарной высотной фронтальной зоны – ее интенсивность – на фоне естественных климатических периодов (рис. 1).

Как видно из рис. 1, при переходе от периода стабилизации ко второй волне глобального потепления (от холодного к теплomu) интенсивность ПВФЗ уменьшается. Идентичное изменение обнаружено практически во все месяцы (Морозова, 2015; 2019). Отметим, что климатическое изменение интенсивности ПВФЗ согласуется с сезонной динамикой. От зимы к лету интенсивность циркуляции снижается, так же и при переходе от более холодного периода (стабилизация) к более теплomu (вторая волна глобального потепления) – в более теплые периоды (вторая волна глобального потепления, летние сезоны) атмосферная циркуляция становится менее интенсивной.

На основании выявленной динамики ПВФЗ можно сформулировать климатически значимый вывод:

при климатическом переходе от холодного периода к теплomu снижается интенсивность атмосферной циркуляции при одновременном расширении площади планетарной высотной фронтальной зоны. Продвижение ПВФЗ к югу предполагает расширение площади околополюсного пространства, то есть области отрицательных аномалий температур, что способствует «затормаживанию» потепления. Такое заключение не противоречит климатической роли ОЦА – сглаживание температурных контрастов между полюсом и экватором.

Посмотрим, справедливо ли обратное утверждение – при снижении средних полушарных температур уменьшается площадь планетарной фронтальной зоны и снижается ее активность. Для этого оценим изменение рассматриваемых характеристик ПВФЗ в две фазы второй волны глобального потепления – активную фазу (1975–1995 гг.) и фазу замедления потепления (1996–2010 гг.) (табл. 2). Напомним, что в конце XX - начале XXI века произошла существенная приостановка темпов глобального потепления.

Видим (табл. 2), что в противоположность данным табл. 1, где было представлено изменение площади планетарной высотной фронтальной зоны в различные климатические периоды, на фоне второй волны глобального потепления происходит сокращение площади ПВФЗ. При этом скорость геострофического ветра возрастает. В качестве примера приведем изменение скорости геострофического ветра в августе (рис. 3). На этом рисунке видно, что во вторую фазу второй волны глобального потепления интенсивность ПВФЗ увеличивается.

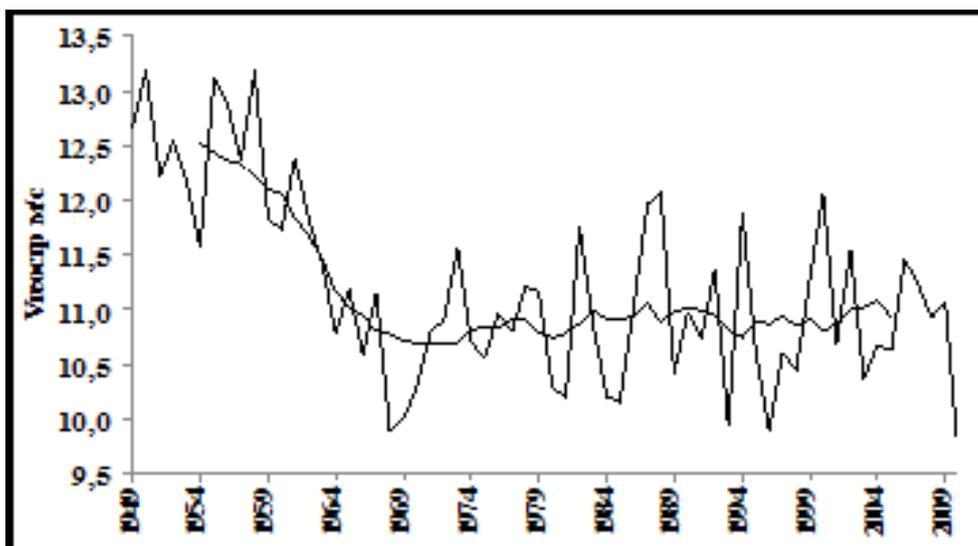


Рис. 1. Изменение средней годовой скорости геострофического ветра  
Жирной линией показано 11-летнее скользящее среднее

Таблица 2. Изменение площадей планетарной высотной фронтальной зоны на фоне второй волны глобального потепления

Период (гг.)	Значение площади ПВФЗ (млн км <sup>2</sup> )		
	среднегодовые	январь	июль
1975–1995 (активная фаза)	58,51	68,5	60,03
1996–2010 (фаза замедления)	56,70 уменьшение на 3%	58,15 уменьшение на 5%	58,98 уменьшение на 2 %

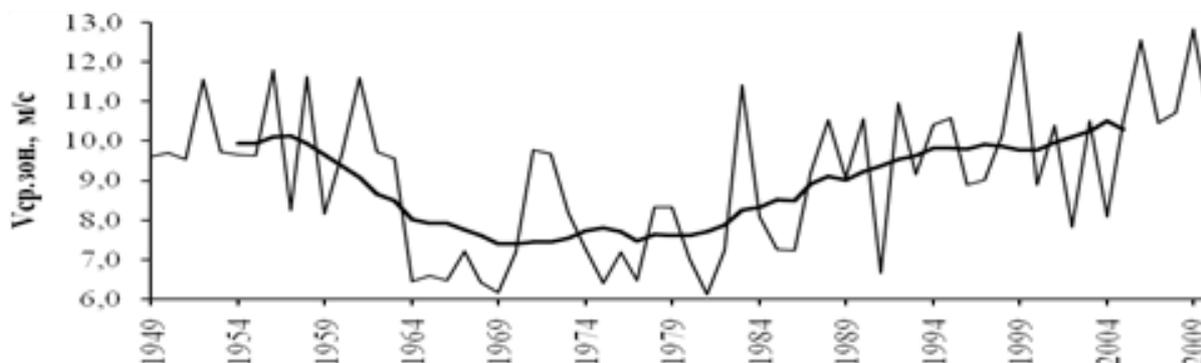


Рис. 2. Скорость геострофического ветра в августе  
Жирной линией показано 11-летнее скользящее осреднение

Вышеописанные зависимости характеристик глобального объекта циркуляции - ПВФЗ – и температурой воздуха можно представить в виде отрицательной обратной связи (рис. 3). На этом рисунке символами  $\Delta t$ ,  $\Delta S$  и  $\Delta V$  обозначены изменения средней температуры полушария, площади ПВФЗ и средней скорости зонального ветра соответственно.

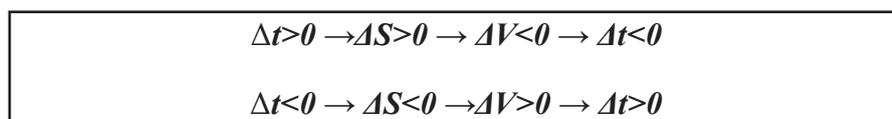


Рис. 3. Схема отрицательной обратной связи между средней полушарной температурой воздуха и характеристиками планетарной высотной фронтальной зоны

Если в климатологию перенести учение из макрометеорологии о естественном климатическом периоде и тенденции периода, то можно замедление потепления рассматривать как тенденцию предстоящего периода, в котором она станет преобладающей. Таким образом можно спрогнозировать наступление непорочного периода стабилизации температуры, но при более высоких температурах, чем период ста-

билизации 50-х – 60-х годов XX века.

Приостановка глобального потепления, замеченная с середины 10-х годов XXI века, подтверждает существование и действие выявленной отрицательной обратной связи. На рис. 4 хорошо виден непродолжительный период стабилизации, представляющий климатическую флуктуацию на фоне развивающегося потепления.

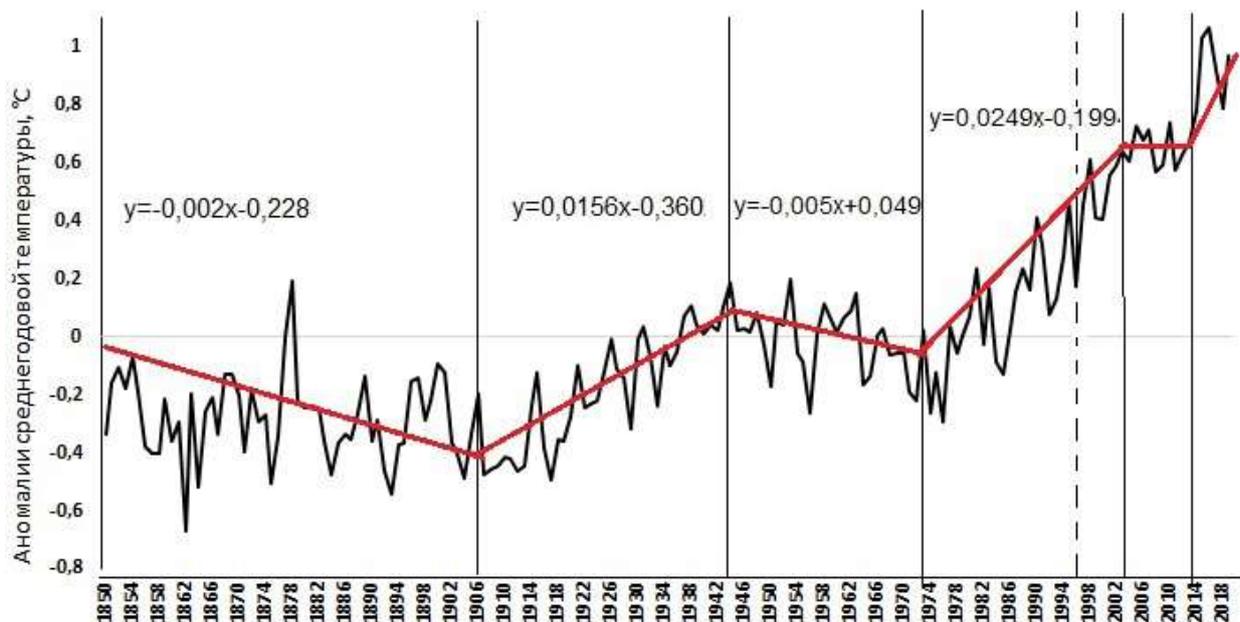


Рис. 4. Изменения средней температуры Северного полушария и естественные климатические периоды состояния земной климатической

Таким образом, можно заключить, что на основе обратных связей возможно прогнозирование климатических флуктуаций на конечных масштабах времени. Укажем, что задача прогноза климатических изменений на основе учета обратных связей в научной литературе ставится впервые. Также впервые описан механизм действия обратной связи, включающей характеристики структурных элементов общей циркуляции атмосферы.

#### Литература

1. Байдал М.Х., Ханжина Д.Г. Многолетняя изменчивость макроциркуляционных факторов климата. М.: Московское отделение Гидрометеиздата. С. 40–52.
2. Кантер Ц.А. О некоторых свойствах полей геопотенциала // Вопросы климата и погоды Нижнего Поволжья, 1965. Вып.1. С.29–39.
3. Морозова С.В. О режиме планетарной высотной фронтальной зоны на фоне настоящих климатических изменений // Труды ВНИИГМИ-МЦД, 2015. Вып. 180. С. 67–75.
4. Морозова С.В. О влиянии планетарной высотной фронтальной зоны на изменение характеристик климатического режима на Северном полушарии

// Изв. Сарат. ун-та. 2014. Том 14. № 2. С. 25–29.

5. Морозова С.В. Роль планетарных объектов циркуляции в глобальных климатических процессах. Саратов. Изд-во СГУ. 2019. 132 с.
6. Неушкин А.И., Сидоренков Н.С., Санина А.Т., Иванова Т.Б., Бережная Т.В., Панкратенко Н.В., Макарова М.Е. Мониторинг общей циркуляции атмосферы. Северное полушарие. Изд-во ВНИГМИ-МЦД. Обнинск. 2013. 200 с.
7. Храбров Ю.Б. Основные черты развития синоптических процессов в естественных синоптических периодах // Труды ЦИП. 1957. Вып. 63. С. 3–19.
8. Morozova SV, Polyanskaya EA, Ivanova GF, Levitskaya NG, Denisov KE, Molchanova NP Variability of the circulation processes in the Lower Volga Region on the global climate trends // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (EES). Volume 107. 2018.
9. Morozova S V, E A Polyanskaya, N K Kononova, N P Molchanova and AP Solodovnikov Peculiarities of the global climate tendencies in the south-east Russian plains // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Volume 381. 2019. <https://iopscience.iop.org/issue/1755-1315/381/1>

## ИЗМЕНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В ОКРЕСТНОСТЯХ БОЛЬШОГО ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА В ТЕПЛЫЙ ПЕРИОД НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ERA5

О.Е. Нечепуренко<sup>1</sup>, К.Н. Пустовалов<sup>1,2</sup>, В.П. Горбатенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия,  
o.e.nechepurenko@gmail.com, vpgor@tpu.ru

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия, const.pv@yandex.ru

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 р\_а.

Рассмотрены средняя температура воздуха и скорости вертикальных потоков за летние месяцы 1990–2019 гг. в сроки 9 и 18 UTC. Выявлено, что нижний слой атмосферы чувствителен к фактору проявления Большого Васюганского болота, что отражается в пространственно-временной изменчивости полей температурно-динамических показателей пограничного слоя атмосферы.

*Ключевые слова:* реанализ, температура воздуха, скорость вертикальных потоков, Большое Васюганское болото

The average air temperature and updraft and downdraft speeds were calculated for the summer months of 1990 to 2019 at 9 and 18 UTC. The lower atmospheric layer is found to be sensitive to manifestation factor of the Great Vasyugan Mire, as evidenced by the spatial and temporal variability of the fields of temperature-dynamic indicators in the atmospheric boundary layer.

*Keywords:* reanalyze, air temperature, updraft and downdraft speeds, the Great Vasyugan Mire

По часовым данным реанализа ERA5 (Hersbach Н. и др., 2018) анализировались средние арифметические значения температуры воздуха на уровне 2 м над подстилающей поверхностью и скорости вертикальных потоков за летние месяцы в 9 и 18 UTC за период с 1990 по 2019 гг. над болотными комплексами Западной Сибири. Применение данных ERA5 обусловлено непрерывными рядами данных за период более 40 лет (с 1979 г. по настоящее время), высоким пространственным ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) и временным (1 час) разрешением (ERA5: data documentation), а также высокой точностью описания температурного режима. Согласно (Гордов и др., 2011), реанализы ECMWF предыдущих поколений обладали наилучшей среди всех реанализов точностью описания температурного режима Сибири, что должно было передаться их приемнику.

За период 1990–1999 гг. в зональном распределении температуры воздуха над Западной Сибирью прослеживается ложбина северо-восточного направления, обусловленная проявлением фактора Большого Васюганского болота (БВБ). На протяжении всего рассматриваемого периода изотерма  $14^\circ\text{C}$  практически оконтуривала БВБ с его южной и западной сторон. В последнюю декаду как внутри территории болота, так и по его северному и восточному контурам отмечаются температурные неоднородности. В междуречье Обь-Иртыш, занятом болотами, и над болотным комплексом юго-западнее Ханты-Мансийска сформировались очаги тепла, на градус и более превышающие средние фоновые температуры.

На основе продукта «Vertical velocity» из реанализа ERA5 проанализированы скорости вертикальных потоков ( $w$ ), которые в физическом проявлении отражают изменение давления в фиксированном объеме воздуха при его поднятии или опускании и имеют единицу измерения – Па/с. Соответственно, отрицательные значения  $w$  говорят о восходящих движениях, а положительные – нисходящих. Для удобства анализа значения  $w$  были переведены в мПа/с. В работе выполнен расчёт средних полей вертикальной скорости на уровне 950 гПа ( $\sim 500$  м), для оценки скоростей вертикальных потоков в различные десятилетия выполнялся расчёт междекадной изменчивости  $w$ .

Влияние больших водоёмов (оз. Чаны, оз. Кулундинское, оз. Убинское и др.) и пойм крупных рек (р. Обь, р. Енисей, р. Иртыш и др.) проявляется в мезомасштабных полях  $w$ ; над этими водными объектами в дневное время отмечаются нисходящие потоки, а в ночное – восходящие. Влияние Большого Васюганского болота (БВБ) и других болотных массивов также прослеживается, но имеет более сложный характер. Над периферийными слабо обводнёнными частями БВБ в дневное время отмечаются преимущественно восходящие потоки, а в ночное – нисходящие (рис. 1). При этом над сильно обводнёнными центральными частями БВБ, представленными топью и мочажинами, наоборот, в дневное время отмечается опускание воздуха, а в ночное – подъём. Данные особенности суточного изменения  $w$  могут быть обусловлены большой теплоёмкостью крупных водных объектов (в т.ч. центральных частей БВБ) и связанной с ней инерционностью в термодинамических процессах.

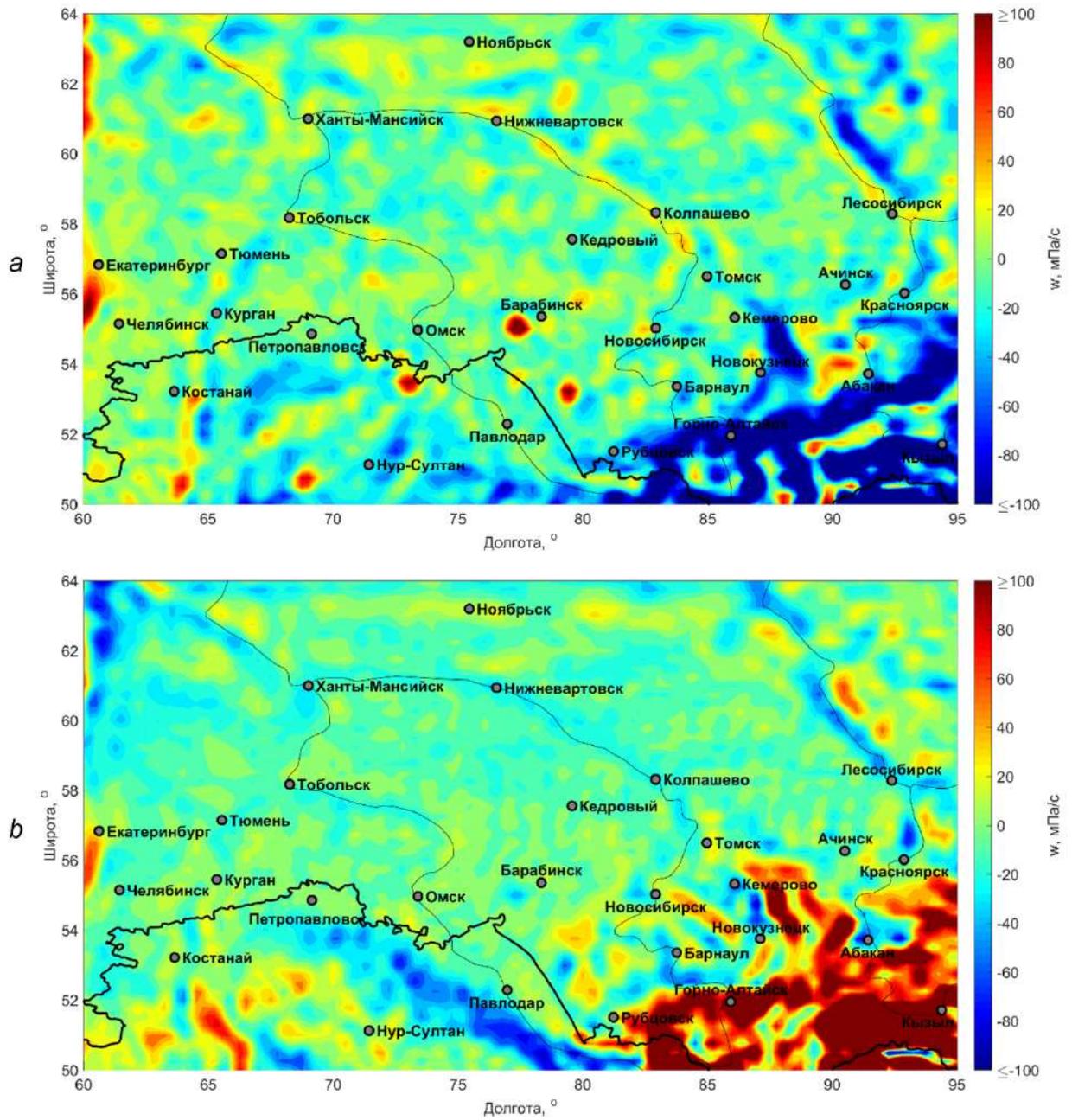


Рис. 1. Средние значения скорости вертикальных потоков  $w$  в сроки 9:00 (а) и 18:00 UTC (б) за летние месяцы 1990–2019 гг. над югом Западной Сибири

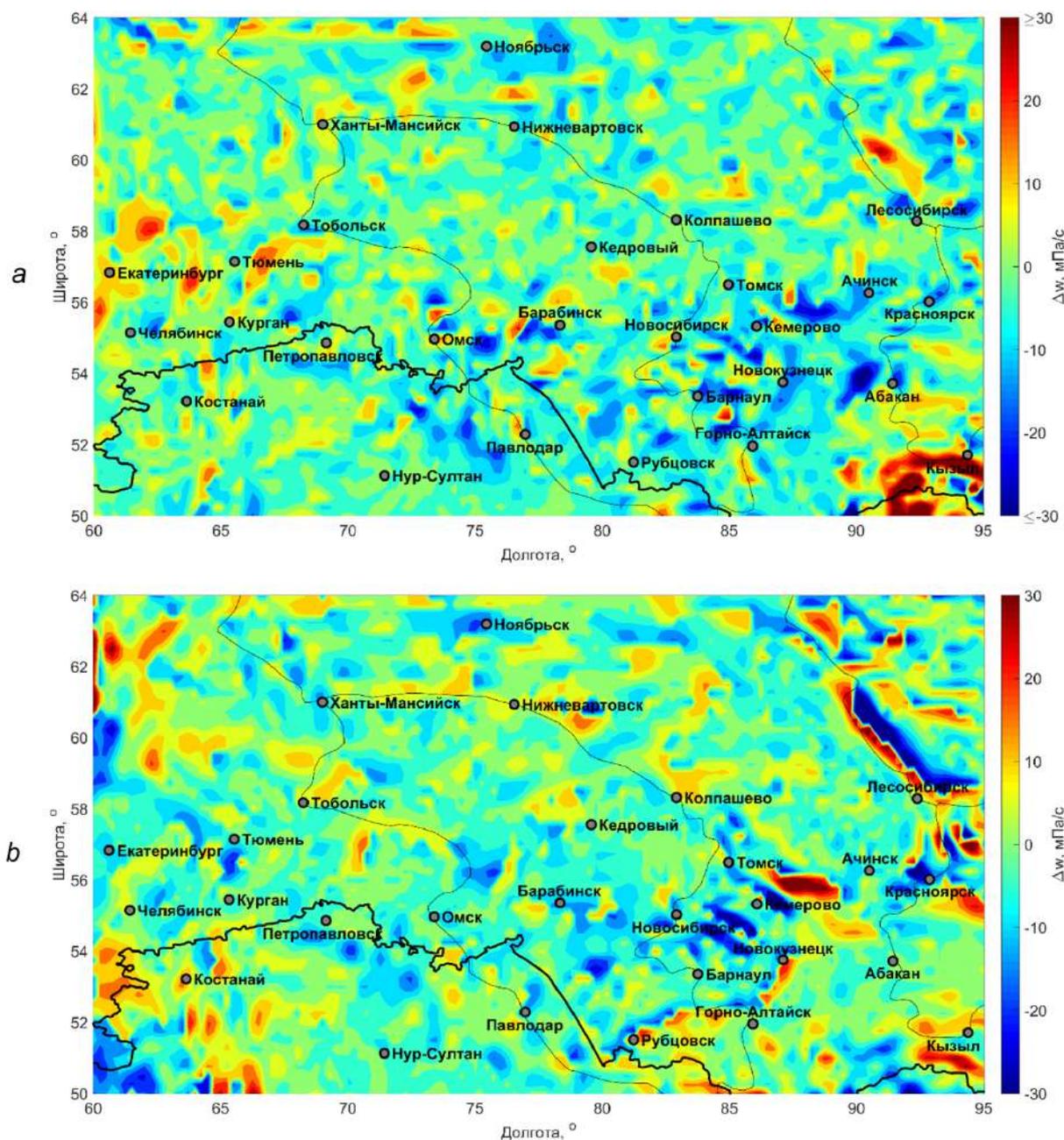


Рис. 2. Изменение средних значений скорости мезомасштабных вертикальных потоков между периодами 2010–2019 и 1990–1999 в сроки 9:00 (а) и 18:00 UTC (б)

Оценки междекадной изменчивости  $w$  (рис. 2) показали, что в последнее десятилетие отмечается значительное увеличение площади зон с восходящими потоками, а также скорости восходящих движений в них ( $\Delta w < 0$ ) как в дневное, так и в ночное время.

### Литература

1. Гордов Е.П., Богомолов В.Ю., Генина Е.Ю., Шульгина Т.М. Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2011. Т. 9, № 1. С. 56–66.
2. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2018. (дата обращения: 22.09.2021), doi: 10.24381/cds.adbb2d47
3. ERA5: data documentation. – URL: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation> (дата обращения: 22.09.2021).

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ МЕСТНОСТИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БУРЯТИЯ

М.В. Оглезнева<sup>1</sup>, П.М. Нагорский<sup>1,2</sup>, К.Н. Пустовалов<sup>1,2</sup>, А.А. Сат<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

oglezneva.m@yandex.ru, npm\_sta@mail.ru, const.pv@yandex.ru, artysh.sat@gmail.com

Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы (номер госрегистрации 121031300154-1).

Проведено исследование высотной изменчивости атмосферно-электрических величин на основе экспериментальных данных, полученных при подъеме на один из хребтов Тункинских гольцов в Республике Бурятия. Отмечается, что при подъеме на хребет концентрации аэроионов в основном снижались. Низкие концентрации аэроионов зарегистрированы на скалистых участках.

*Ключевые слова:* атмосферное электричество, аэроионы, горы

On the basis of the experimental data obtained during the ascent to one of the ridges of the Tunka range in the Republic of Buryatia, a study of the altitudinal variability of atmospheric-electrical values was carried out. It is noted that with an increase in altitude, the concentration of air ions mainly decreased. Low concentrations of air ions were recorded in rocky areas.

*Keywords:* atmospheric electricity, airions, mountains

Ионы, присутствующие в атмосферном воздухе, играют огромную роль в атмосферных процессах (Тверской, 1949; Hirsikko, 2011). При этом различные физико-географические и метеорологические факторы по-разному оказывают влияние на содержание аэроионов в воздухе (Смирнов 1992; Hirsikko, 2011). Знания о закономерностях пространственно-временной изменчивости концентрации ионов позволяют оценивать степень комфортности и полезности различных физико-географических условий и ландшафтов для жизнедеятельности человека (Grafetstätter et al., 2017; Ling, 2010). Также необходимо проводить контроль (мониторинг) аэроионной обстановки с целью оценки фонового содержания аэроионов, характерного для разных ландшафтов, и выявления многолетнего изменения их количества, как индикатора состояния окружающей среды в условиях возрастающей антропогенной нагрузки и современных климатических изменений. Данная работа направлена на изучение влияния высоты местности на концентрации аэроионов.

Исследование проводилось в августе 2020 г. в Тункинском районе Республики Бурятия. Гребень, где проводили измерения концентраций аэроионов, относится к склону южной экспозиции хребта Тункинские Гольцы (рис. 1).

Измерения производились при помощи следующего оборудования:

1. счётчик аэроионов Air Ion Counter Model AIC2-R0 (AlphaLab, Inc.; США) – портативный прибор, предназначенный для измерения числа положительных и отрицательных аэроионов в сантиметре кубическом воздуха в диапазоне от 0 до 2 млн. с погрешностью  $\pm 20\%$ ;

2. портативный термогигрометр MS-6508 (Precision mastech enterprises company; Гонконг) – измеряет мгновенные значения температуры воздуха, температуру точки росы, температуру смоченного термометра и относительной влажности воздуха, а также рассчитывает минимальные и максимальные их значения за период измерений;
3. портативный анемометр MS6252A (Precision mastech enterprises company; Гонконг) – измеряет мгновенные значения скорости воздушного потока (ветра) и расхода воздуха, а также рассчитывает минимальные и максимальные их значения за период измерений.

Все измерения проводились в условиях «хорошей погоды», при которых отсутствуют облака нижнего яруса (общее количество не более 5 баллов), туман, мгла, осадки, скорость ветра не должна превышать 6 м/с и пр., приводящие к сильному возмущению её электрических характеристик.

Подъем осуществлялся от поселка Аршан (900 м) до высоты 1440 м. На первом участке восхождения (900–1000 м) растительность, в основном, представлена березово-лиственничными и лиственнично-сосново-березовыми разнотравными лесами с богатым подлеском, относящиеся к подтаежному поясу. На высоте от 1000 до 1300 м, где расположены большинство измерительных точек, наблюдаются таежные леса, в которых среди древесных пород преобладают лиственница и сосна. На маршруте встречаются скалистые участки, представляющие из себя голые скальные породы. Крайняя верхняя измерительная точка находится на высоте 1440 м на участке с разнотравной растительностью и кустарниками.



Рис. 1. Некоторые точки измерения аэроионов при подъеме на Тункинские гольцы 12 августа 2020 г.

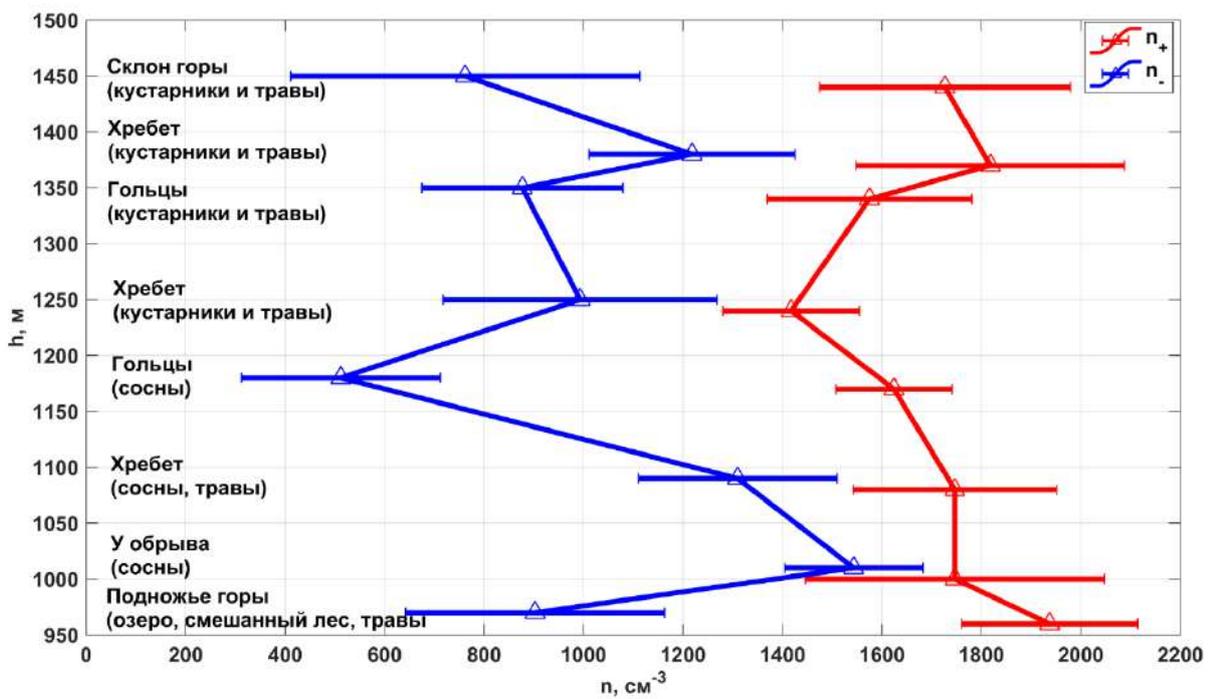


Рис. 2. Изменение содержания аэроионов при подъеме на Тункинские гольцы 12.08.2020 г.

При подъеме на Тункинские гольцы (рис. 2) наблюдается преобладание положительных аэроионов над отрицательными. Отмечается, что концентрации аэроионов в основном снижались. Минимальные значения для отрицательных ионов были зарегистрированы на гольцах (~500 см<sup>-3</sup>). В целом, содержание отрицательных аэроионов в горных условиях не превышает 1500 см<sup>-3</sup>. Средние концентрации положительных ионов изменяются в пределах от 1400 до 1900 см<sup>-3</sup>, а низкие значения, как и в случае отрицательных ионов отмечаются на гольцах.

Максимальная изменчивость аэроионов наблюдалась в точках, где подстилающая поверхность представлена травами с кустарничковой растительностью, а также присутствует свободный воздухообмен. Малая динамика концентраций отмечается над скалами, где, вероятно, осложнен процесс ионизации почвенным радоном и его производными.

## Литература

1. Смирнов В. В. Ионизация в тропосфере. В. В. Смирнов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 309 с.
2. Тверской П. Н. Атмосферное электричество / П. Н. Тверской. Л.: Гидрометеиздат, 1949. 252 с.
3. Grafetstätter C., Gaisberger M., Proseggger J., Ritter M., Kolarz P., Pichler C., Thalhamer J., Hartl A. Does waterfall aerosol influence mucosal immunity and chronic stress? A randomized controlled clinical trial? *J. Physiol. Anthropol.* 2017. 36, 10.
4. Hirsikko A., Nieminen T., Gagne S., Lehtipalo K., Manninen H. E., Ehn M., Horrak U., Kerminen V.-M., Laakso L., McMurry P. H., Mirme A., Mirme S., Petaja T., Tammet H., Vakkari V., Vana M., Kulmala M. Atmospheric ions and nucleation: a review of observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011. 11(2), 767–798.
5. Ling X., Jayaratne R., Morawska L. Air ion concentrations in various urban outdoor environments. *Atmos. Environ.* 2010. 44, 2186–2193.

УДК 551.5

## ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ 1976–2019 ГГ.

Ю.П. Переведенцев<sup>1</sup>, Б.Г. Шерстюков<sup>2</sup>, К.М. Шанталинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия, [upereved@kpfu.ru](mailto:upereved@kpfu.ru)  
<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –  
Мировой центр данных, Обнинск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-55-00014).

Рассмотрена пространственно-временная изменчивость приземной температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России по данным 1251 станций за период 1976–2019 гг. Главное внимание уделено анализу трендов указанных характеристик, что позволило оценить масштабы потепления климата в последние десятилетия. Установлена корреляционная связь между индексами атмосферной циркуляции (NAO, AO, EAWR, SCAND) с колебаниями температуры на Европейской территории России.

*Ключевые слова:* температура воздуха, атмосферные осадки, параметры линейного тренда, индексы атмосферной циркуляции, коэффициент корреляции.

The spatial-temporal variability of the surface air temperature and atmospheric precipitation in the territory of Russia is considered according to the data of 1251 stations for the period 1976–2019. The main attention is paid to the analysis of the trends of these characteristics, which made it possible to assess the scale of climate warming in recent decades. A correlation has been established between the atmospheric circulation indices (NAO, AO, EAWR, SCAND) with temperature fluctuations in the European territory of Russia.

*Keywords:* air temperature, precipitation, linear trend parameters, atmospheric circulation indices, correlation coefficient.

В настоящее время открытый доступ к метеорологическим данным, развитие современных информационно-вычислительных технологий позволяют исследовать происходящие климатические процессы как глобальные, так и в отдельных крупных регионах Земли, в том числе на территории России. Изучению климата России посвящен ряд работ (Барцев и др., 2016; Бардин и др., 2020; Доклад ..., 2021). Так в (Бардин и др., 2020), рассмотрены изменения приземной

температуры над сушей земного шара (1901–2019 гг.), а также температуры и осадков на территории Российской Федерации (1936–2019 гг.). В ней, в частности, выявлено, что за период 1976–2019 гг. средняя по России среднегодовая температура растет со скоростью 0,47°C/10 лет, при этом Европейская часть России теплеет быстрее ее Азиатской части, в Арктической зоне скорость потепления достигает 0,69°C/10 лет. В зимний период на территории России с середины 1970-х

годов до середины 1990-х произошло исключительно быстрое потепление, по-видимому, связанное с ростом индекса NAO, затем наступило похолодание, продолжавшееся до 2010 г.

Известно, что большую часть времени в 1950–1987, 1988–1997 и 1998–2004 гг. среднегодовая глобальная приповерхностная температура практически постоянна, а все потепление происходит в течение коротких событий посредством скачков 1987 и 1997 годов. Высказано предположение, что аналогичный скачок произошел в 2015–2016 годы, т.е. обнаруживается «лестница» потепления с середины 20 века (Барцев и др., 2016).

Цель настоящей статьи рассмотреть пространственно-временные изменения основных климатических показателей на территории России в современный период глобального потепления климата в 1976–2019 гг.

### **Исходные данные и методика исследований**

Расчеты выполнялись с использованием данных 1251 метеорологических станций, расположенных на территории России из фонда ВНИИГМИ-МЦД за 1976–2019 гг. Многолетние ряды исходных данных подвергались статистической обработке – находились средние величины, средние квадратические отклонения (СКО), аномалии температуры воздуха и атмосферных осадков, линейные тренды температуры и осадков на территории России для периодов 1976–2019 и 2001–2019 гг.

### **Результаты исследования**

Были построены карты трендов температуры воздуха для центральных месяцев сезонов и годовых значений для всей территории России по данным 1251 станций для периода 1976–2019 гг. Рассмотрим пространственное распределение трендов температуры за весь 44-летний период исследования (1976–2019 гг.).

В январе наибольшая скорость потепления наблюдается в Средней Сибири, арктическом побережье с максимумом на полуострове Таймыр и арктических островах от Новой Земли до Новосибирских островов, где величина коэффициента наклона линейного тренда (КНЛТ) достигает  $1,2^{\circ}\text{C}/10$  лет, значительный рост ТВ (КНЛТ= $0,80\text{--}0,99^{\circ}\text{C}/10$  лет) наблюдается на территории Хабаровского края, в Европейской части России (ЕЧР) выделяется северо-запад, где КНЛТ в районе Архангельска достигает  $0,80\text{--}0,99^{\circ}\text{C}/10$  лет. Остальная часть ЕЧР также испытывает потепление, но меньшей интенсивности (КНЛТ меняется в пределах  $0,20\text{--}0,59^{\circ}\text{C}/10$  лет). Очаги похолодания сформировались на юге Западной Сибири, где КНЛТ < 0 и меняется в пределах от  $-0,40$  до  $-0,79^{\circ}\text{C}/10$  лет и в Восточной Сибири (Магаданская область).

В апреле картина более однородная. Вся ЕЧР, кроме территории Северного Кавказа, охвачена умеренным потеплением с максимумом на Арктическом побережье, где значение КНЛТ достигает  $0,80\text{--}0,99^{\circ}\text{C}/10$  лет. Обширная территория Западной, Средней и Вос-

точной Сибири, все Арктическое побережье от Ямала до Чукотки, арктические острова заняты интенсивным потеплением (КНЛТ в районе Таймыра достигает  $1,2^{\circ}\text{C}/10$  лет). Практически вся территория России испытывает потепление климата.

В июле запад и юго-запад ЕЧР заняты достаточно интенсивной областью потепления (КНЛТ меняется от  $0,60$  до  $0,99^{\circ}\text{C}/10$  лет), на остальной части России за исключением средней полосы Западной Сибири, где потепление практически отсутствует, преобладает слабый рост ТВ со скоростью от  $0,20$  до  $0,59^{\circ}\text{C}/10$  лет.

В октябре происходит более активное потепление. Вся территория России от ее западных до восточных границ (за исключением Камчатки) подвержена потеплению климата. Наиболее интенсивный рост ТВ наблюдается в северных районах Сибири, на Арктическом побережье и Чукотке, где КНЛТ превышает  $1,2^{\circ}\text{C}/10$  лет.

Тренды среднегодовой температуры свидетельствуют об умеренном потеплении климата практически на всей территории России. Наиболее интенсивно оно происходит на арктическом побережье Азиатской части России и прилегающих островах. Так, в районе полуострова Таймыр КНЛТ достигает значения  $1,2^{\circ}\text{C}/10$  лет. При этом в центральной и северных частях Сибири потепление более выражено, чем на ЕЧР, где выделяется Карелия и юго-запад Центрального федерального округа (КНЛТ= $0,60\text{--}0,79^{\circ}\text{C}/10$  лет).

Эти результаты для территории России согласуются с данными работы [2], в которой представлены результаты глобального мониторинга температурного режима над сушей Земного шара с использованием данных 3288 метеорологических станций. Согласно этой работе, в период 1976–2019 гг. по среднегодовым данным вдоль всего арктического побережья России тренд достигает  $0,8^{\circ}\text{C}/10$  лет и более, на островах Баренцева и Карского морей –  $1,5^{\circ}\text{C}/10$  лет, на Таймыре и Камчатке КНЛТ порядка  $1,2^{\circ}\text{C}/10$  лет, а на ЕЧР величина тренда достигает  $0,7^{\circ}\text{C}/10$  лет.

Рассмотрим региональные особенности изменения режима атмосферных осадков в период 1976–2019 гг. на территории России. Пространственная картина распределения трендов осадков по территории России весьма неоднородная. Так, в январе на ЕЧР наблюдается рост осадков со скоростью  $1,0\text{--}1,9$  мм/10 лет с максимумом на северо-западе, где КНЛТ= $2,0\text{--}2,9$  мм/10 лет. В центре и на юге Западной Сибири, в Алтае и на северо-востоке Восточной Сибири, включая Чукотку, отмечается снижение осадков (КНЛТ достигает  $-2,0\text{--}2,9$  мм/10 лет). В то же время выделяется северный регион Западной и Средней Сибири от п-ва Таймыр до Новосибирских островов, где осадки увеличиваются со скоростью достигающей  $2,0\text{--}2,9$  мм/10 лет.

В апреле основной очаг прироста осадков смещается с ЕЧР в восточном направлении на Предуралье, Западную и Среднюю Сибирь, где КНЛТ достигает  $3,0\text{--}3,9$  мм/10 лет. Основные очаги понижения осадков формируются на Северном Кавказе, в Магаданской области, в Приамурье и Приморье, где КНЛТ в отдельных местах  $\sim\text{--}4,0$  мм/10 лет.

В июле практически вся ЕЧР за исключением северо-запада, западная часть Западной Сибири, арктическое побережье от Таймыра до Чукотки, Магаданская область и Камчатка, Предбайкалье и Забайкалье находятся в зоне уменьшения осадков, так КНЛТ < -4 мм/10 лет на ЕЧР и Камчатке, в то же время юг Восточной Сибири, Приамурье и Приморье располагаются в зоне роста осадков (КНЛТ > 4 мм/10 лет). В октябре большая часть территории России испытывает рост атмосферных осадков (максимум на Чукотке, где КНЛТ > 4 мм/10 лет). Очаги с уменьшением сумм осадков носят пятнистый характер, разбросаны по территории России и менее интенсивны: выделяются Карелия, юг Западной Сибири, Дальневосточные районы, где КНЛТ на о. Сахалин порядка -3,0–3,9 мм/10 лет.

Тренды, построенные по годовым значениям сумм осадков, свидетельствуют об увеличении осадков на большей части территории России. Так, на побережье Охотского моря КНЛТ > 25 мм/10 лет. Понижение сумм осадков наблюдается в центре и на юге ЕЧР, Северном Кавказе, где КНЛТ ~ 10–14 мм/год. Небольшие очаги с уменьшением осадков отмечаются на о. Новая Земля, юге Средней Сибири, северо-востоке Чукотки.

В докладе об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 г. указывается, что на территории России в период 1976–2019 гг. преобладает тенденция к увеличению годовых сумм осадков с трендом составляющим 2,2 % нормы/10 лет, что согласуется с выводами авторов статьи.

Для оценки влияния циркуляции атмосферы на термический режим ЕЧР рассчитывались коэффициенты корреляции  $r$  в период 1976–2019 гг. между временными рядами индексов атмосферной циркуляции (АО, NAO, EAWR, SCAND) и температурой воздуха на отдельных станциях. Всего использовалось 95 станций. Были построены карты изокоррелят для января и июля. Выявились следующие особенности. В январе с арктической осцилляцией (АО) связи более тесные на западе и в центре региона (в районе Пскова  $r = 0,6$ ), в направлении с юго-запада на северо-восток происходит их ослабление и в Северном Предуралье ( $r = 0,2$ ). В июле связи незначимы. С индексом североатлантического колебания (NAO) в январе также связи более тесные в западной и центральной части региона ( $r = 0,7$ ), в восточном направлении происходит заметное ослабление влияния NAO, а на юго-востоке ЕТР  $r$  уменьшается до 0,2 и меньших значений (Оренбург). В июле значения коэффициентов корреляции незначительны ~0,2. Таким образом, арктическая осцилляция и североатлантическое колебание оказывают заметное воздействие на термический режим региона в зимний период и прежде всего на его западную и центральную часть. Это воздействие положительное, т.е. атмосферная циркуляция способствует потеплению региона в зимний период. Циркуляционная мода Восточная Атлантика-Западная Россия (EAWR) наибольшее влияние оказывает в летний период и в основном на центр и особенно восток региона, где величина  $r = -0,7$ , что свидетельствует об охлаждающем влиянии Северной

Атлантики в этот период. Связь температуры воздуха с индексом SCAND в январе лучше выражена в южной половине ЕЧР и особенно на востоке территории (Урал, Оренбуржье, Северной Кавказ), где  $r$  принимает отрицательное значение ( $r = -0,6$ ). Таким образом, формирование блокирующего скандинавского антициклона заметно влияет на зимний термический режим востока ЕЧР и способствует понижению ТВ. В июле связь между компонентами выше на северо-западе ЕЧР ( $r = +0,4$ ) и ослабевает в направлении юго-востока.

В ранее выполненных работах (Бардин и др., 2019; Попова, 2018) показана важная роль крупномасштабной циркуляции атмосферы в изменениях современного климата. Согласно (Попова, 2018), на севере Евразии в период ослабления зональной циркуляции (индекс АО имел устойчивый нисходящий тренд) возникали температурные экстремумы в июле и июне 2010, 2012 и 2016 гг. В работе (Бардин и др., 2019) показано, что в последние десятилетия в зимний период на территории России температура воздуха характеризуется в основном трендом, примерно вдвое превосходящим тренд «глобального потепления», и наложенным на него естественным колебанием с периодом около 40 лет и амплитудой несколько менее градуса, связанным с вариациями ведущих мод крупномасштабной атмосферной циркуляции в атлантико-европейском секторе – NAO и SCAND.

В целом полученные авторами результаты по оценке влияния крупномасштабной атмосферной циркуляции на термический режим ЕЧР в период 1976–2019 гг. не противоречат выводам указанных работ.

## Заключение

В заключение отметим следующие основные особенности изменения температурно-влажностного режима на территории России в 1976–2019 гг., полученные в результате анализа вычисленных трендов для центральных месяцев сезонов и годовых значений приземной температуры воздуха и атмосферных осадков.

В 1976–2019 гг. практически на всей территории России происходило потепление климата, которое сопровождалось, особенно в ее азиатской части, увеличением годовых сумм осадков.

Полученные в работе тренды температуры воздуха и атмосферных осадков для центральных месяцев сезонов могут служить дополнением к результатам анализа сезонных трендов этих величин представленных в (Доклад ..., 2021), так как, согласно (Бардин и др., 2019), ход сезонной температуры, в особенности зимней, в последние десятилетия определяется не обязательно только вкладом центрального месяца сезона.

Циркуляционный фактор играет важную роль в динамике термического режима ЕЧР. Происходит заметное изменение характера статистических связей в зависимости от индекса циркуляции. Если АО и NAO более эффективно влияют на термический режим западных районов зимой (связи положительные), то SCAND зимой в значительно большей степени влияет на восток региона (связь отрицательная). Колебание

EAWR также более эффективно воздействует на восток региона, но уже в летний период и с отрицательным знаком. Роль циркуляционных факторов на рассматриваемой территории неоднородная как по знаку, так и интенсивности.

### Литература

1. Бардин М.Ю., Платова Т.В., Самохина О.Ф. Изменчивость антициклонической активности в умеренных широтах Северного полушария. // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2019. №3. С. 32–58.
2. Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Платова Т.В., Самохина О.Ф., Корнева И.А. Современные изменения приземного климата по результатам регулярного мониторинга. // *Метеорология и гидрология*. 2020. №5. С. 29–45.
3. Барцев С.Н., Белолипецкий П.В., Дегерменджи А.Г., Иванова Ю.Д., Почекутов А.А., Салтыков М.Ю. Новый взгляд на динамику климата земли. // *Вестник российской академии наук*. 2016. Т. 86. №3. С. 244–253.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М., 2021, 104 с.
5. Попова В.В. Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции. // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2018. №1. С. 84–111.

УДК 551.594.1

## СУТОЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФОНОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БУРЯТИЯ

К.Н. Пустовалов<sup>1,2</sup>, П.М. Нагорский<sup>1</sup>, М.В. Оглезнева<sup>1</sup>, А.А. Сат<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия,*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия  
const.pv@yandex.ru, npt\_sta@mail.ru, oglezneva.m@yandex.ru, artysh.sat@gmail.com*

Работа выполнена при поддержке госбюджетной темы (номер государственной регистрации 121031300154-1).

Проведено исследование суточной изменчивости атмосферно-электрических величин в условиях «хорошей погоды» в горной местности на основе экспериментальных данных, полученных входе экспедиции в Республику Бурятия. Отмечено, что максимум градиента потенциала электрического поля в приземном слое отмечается в послеполуденное и вечернее время, а минимум – ночью. Содержание аэроионов, в целом, изменяется противофазно электрическому полю. С увеличением абсолютной высоты местности среднесуточные значения градиента потенциала электрического поля возрастают.

*Ключевые слова: атмосферное электричество, условия «хорошей погоды», суточные вариации, горы*

On the basis of the experimental data obtained during the expedition to the Republic of Buryatia, the study of the daily variability of atmospheric-electrical quantities under the “fair weather” conditions in the mountainous area was carried out. It is noted that the maximum of the electric field potential gradient in the surface layer is observed in the afternoon and evening, and the minimum is observed at night. The content of air ions, in general, changes in antiphase to the electric field. With an increase in the absolute height of the area, the average daily values of the electric field potential gradient increase.

*Keywords: atmospheric electricity, “fair weather” conditions, diurnal variations, mountains*

Известно, что суточные вариации атмосферно-электрических величин обусловлены влиянием как глобальных (унитарная вариация – кривая Карнеги (Анисимов, Мареев, 2008; Harrison, 2013)), так региональных и локальных факторов (Bennett, Harrison, 2008; Anisimov et al., 2014; Аджиев, Куповых, 2015; Yaniv et al., 2016). Вклад последних может существенно отличаться в различных регионах земного шара. Для континентальных районов минимум и максимум около 4 и 19 UTC соответственно, обусловленные унитарной вариацией электрического поля, проявляются значительно слабее чем в близи моря, и при этом часто отмечается дополнительный дневной максимум,

обусловленный конвективным генератором, особенно активным в локальный полдень (Анисимов, Мареев, 2008; Атмосфера, 1991). В настоящее время исследование атмосферно-электрических суточных вариаций в условиях «хорошей погоды» выполнялись для различных регионов (Bennett, Harrison, 2007; Anisimov et al., 2014; Аджиев, Куповых, 2015; Yaniv et al., 2016). Однако, подобных исследований для территории юга Сибири до сих пор не проводилось.

В августе 2020 г. проводилась геофизическая экспедиция в Тункинский район Республики Бурятия. Одной из задач экспедиции была оценка суточной изменчивости невозмущённых значений атмосферно-э-

лектрических величин, а также влияния на неё абсолютной высоты местности и форм рельефа.

Территория исследования располагается в пределах юго-западной части Байкальской рифтовой зоны и представляет собой серию котловин, ограниченную с юга и севера хребтами Хамар-Дабан и Тункинские гольцы, соответственно. Измерения суточной изменчивости атмосферно-электрических величин проводились на трёх ключевых участках в пределах исследуемой территории (рис. 1, 2):

- 1) «Тункинская котловина» (степной участок в восточной части Тункинской котловины вблизи с. Тунка);
- 2) «Мондинская котловина» (пойма р. Иркут в западной части Мондинской котловины вблизи п. Монды);
- 3) «Тункинские гольцы» (южный склон хр. Тункинские гольцы вблизи с. Аршан).

Для исследования было использовано следующее основное оборудование:

- 1) электростатический флюксметр EFS-2/50 (ООО НТЦР, Россия) – портативный прибор, позволяющий измерять напряжённость электрического

поля (вертикальную компоненту) в диапазоне от 0 до  $\pm 20000$  В/м, откалиброванный с помощью калибровочного стенда (плоский конденсатор) и флюксметра CS110 (Campbell Scientific, Inc.);

- 2) счётчик аэроионов Air Ion Counter Model AIC2-R0 (AlphaLab, Inc., США) – портативный прибор, предназначенный для измерения числа положительных и отрицательных аэроионов в см<sup>3</sup> воздуха в диапазоне от 0 до 2 млн. с погрешностью  $\pm 20$  %;
- 3) автоматическая метеорологическая станция Amtast AW003 (Amtast USA Inc.; США) – портативная метеостанция, измеряющая температуру и относительную влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, поток суммарной солнечной радиации и ультрафиолетового излучения, количество и интенсивность жидких осадков.

Измерения вариаций исследуемых величин на каждом ключевом участке производились в течении не менее одних полных суток в условиях «хорошей погоды» (РД-52.04.168-88). Кроме инструментальных измерений производились синхронные наблюдения за облачностью и атмосферными явлениями.

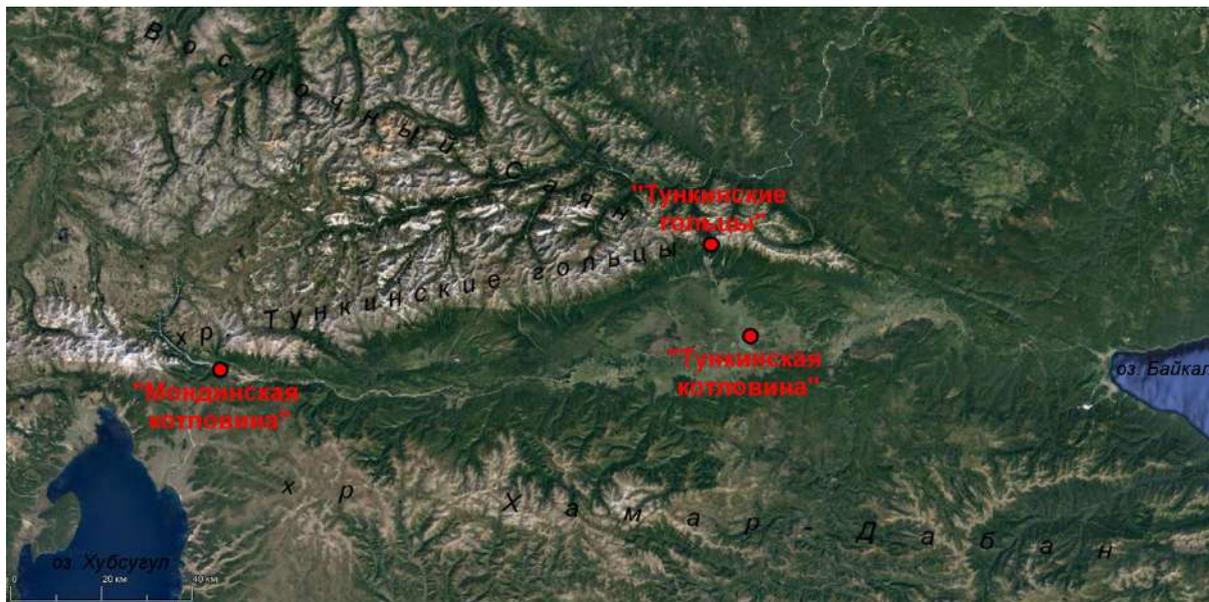


Рис. 1. Спутниковое изображение территории исследования и расположение ключевых участков, на которых выполнялись измерения.

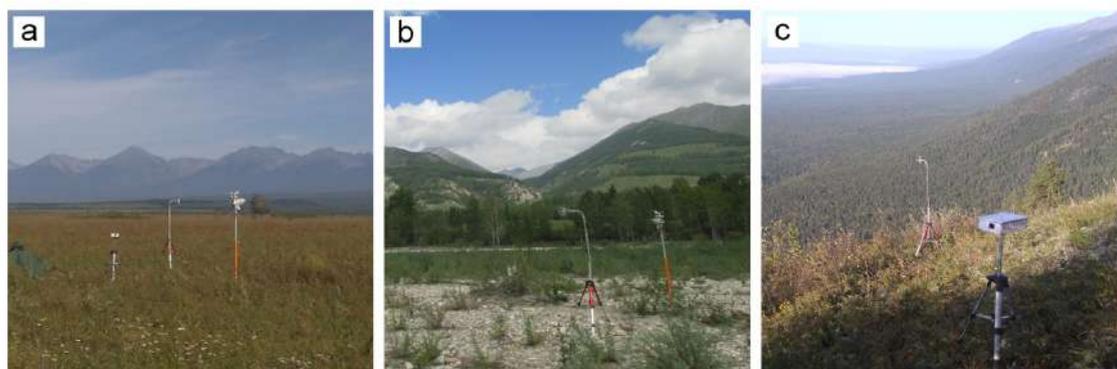


Рис. 2. Расположение измерительного оборудования на ключевых участках: Тункинская котловина (а), Мондинская котловина (б), Тункинские гольцы (с).

На основе экспериментальных данных были получены оценки суточной изменчивости атмосферно-электрических величин в невозмущенных атмосферных условиях на территории исследования, а также влияния на неё высоты местности и форм рельефа (рис. 3, 4). В суточном ходе градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\phi$ ) на территории исследования максимум отмечается в вечернее время (~16–19 ч LT). При этом данный максимум смещён относительно главного максимума унитарной вариации (Кривой Карнеги) на ~10 ч на более раннее время.

Минимум  $\nabla\phi$ , в целом, отмечается ночью, однако, время его наступления сильно изменяется от одного ключевого участка к другому. Содержания аэроионов, в целом, изменяется противофазно  $\nabla\phi$  – в послеполуночное и вечернее время отмечается минимум  $n_{\pm}$ , а в ночное и утреннее – максимум. Среднесуточное значение  $n^{+}$  и  $n^{-}$  на исследуемой территории составляют

~1500 и 500  $\text{см}^{-3}$ . Кроме главного максимума  $\nabla\phi$  на всех ключевых участках также отмечается дополнительный максимум, обусловленный интенсивным прогревом и турбулентным перемешиванием. При этом он приходится на разное время в зависимости от расположения участков и их абсолютной высоты.

Первым он регистрируется на ключевом участке «Тункинские гольцы», затем на участке «Мондинская котловина» и последним на участке «Тункинская котловина». Данное отличие, предположительно, связано с разным временем восхода солнца на этих участках, расположенных на различных высотах и формах рельефа, из-за кривизны земной поверхности и влияния орографии (хр. Хамар-Дабан).

Сравнение среднесуточных значений на различных ключевых участках показало, что с увеличением абсолютной высоты местности градиент потенциала возрастает (рис. 4).

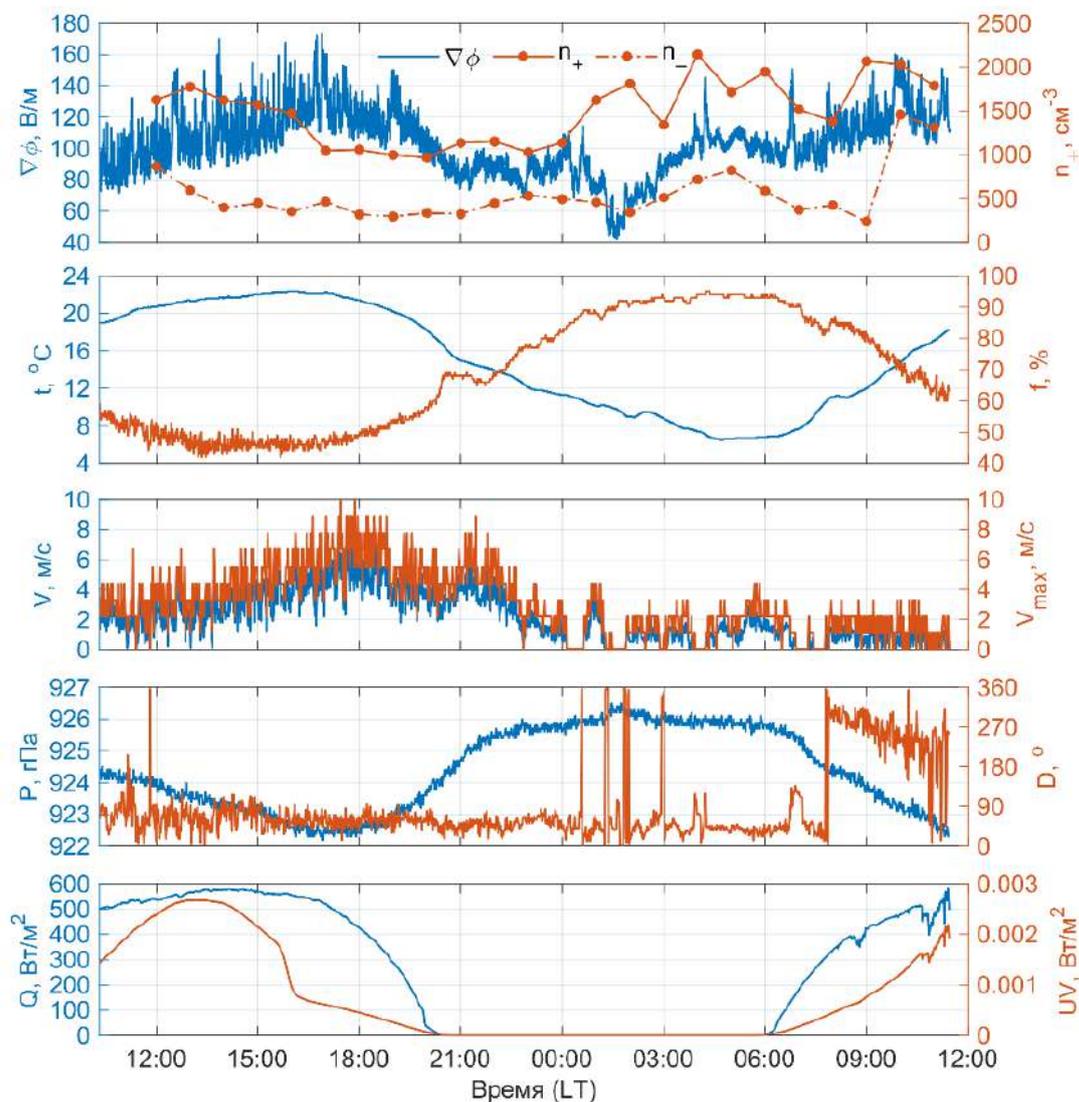


Рис. 3. Вариации градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\phi$ ) и концентраций положительных ( $n_{+}$ ) и отрицательных ( $n_{-}$ ) аэроионов, температуры ( $t$ ) и относительной влажности ( $f$ ) воздуха, средней ( $V$ ) и максимальной ( $V_{\max}$ ) скорости ветра, атмосферного давления ( $P$ ), направления ветра ( $D$ ), потока суммарной солнечной радиации ( $Q$ ) и ультрафиолетового излучения ( $UV$ ) на ключевом участке «Тункинская котловина» за 17–18.08.2021 г. На графике время местное.

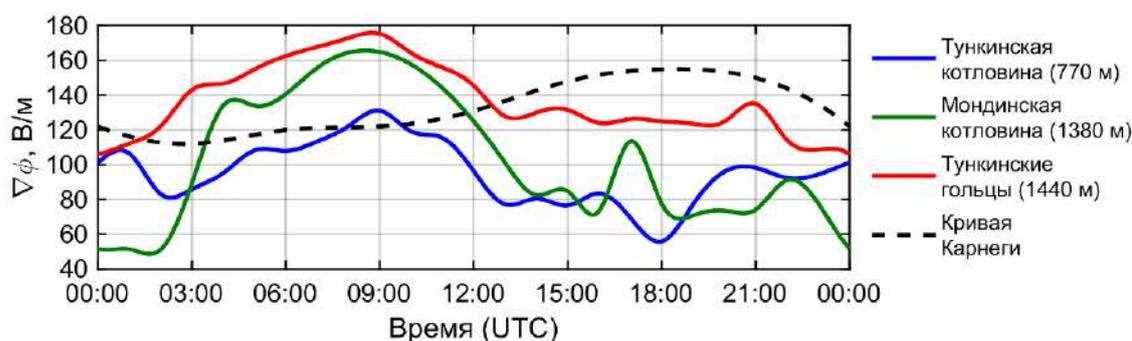


Рис. 4. Сглаженные суточные вариации  $\nabla\phi$  на ключевых участках и унитарная вариация (кривая Карнеги).

Так, среднесуточное значение  $\nabla\phi$  на ключевом участке «Тункинская котловина» (770 м над у.м.) равно 95 В/м, на участке «Мондинская котловина» (1380 м над у.м.) – 103 В/м, а на участке «Тункинские гольцы» (1440 м над у.м.) – 138 В/м. Отмеченная зависимость хорошо согласуется с оценками, полученными на Кавказе (Аджиев, Куповых, 2015), где также был зарегистрирован рост  $\nabla\phi$  с высотой местности. При этом значительное влияние также оказывает форма рельефа. Так, на участках «Мондинская котловина» и «Тункинские гольцы», абсолютная высота которых отличается всего на 60 м, различие в среднесуточных значениях  $\nabla\phi$  оказывается более сильным (35 В/м вместо 8 В/м) чем между участками «Тункинская котловина» и «Мондинская котловина», разность высоток которых составляет более 600 м. Предположительно имеет место занижение  $\nabla\phi$  на дне узкой котловины и завышение на хребте относительно плоской местности, типичной для первого участка.

### Литература

1. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 6. С. 710–715.
2. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Геофизические исследования глобальной электрической цепи // Физика Земли. 2008. № 10. С. 8–18.
3. РД-52.04.168-88. Методические указания. Наблюдения за атмосферным электричеством на станциях. М.: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, 1989. 35 с.
4. Anisimov S.V., Afinogenov K.V., Shikhova N.M. Dynamics of undisturbed midlatitude atmospheric electricity: from observations to scaling // Radiophys. Quantum Electron. 2014. V. 56, № 11. pp. 709–722.
5. Bennett A.J., Harrison R.G. Atmospheric Electricity in Different Weather conditions // Weather. 2007. V. 62. pp. 277–283.
6. Bennett A.J., Harrison R.G. Variability in surface atmospheric electric field measurements // J. Phys.: Conf. Ser. 2008. V. 142. pp. 012046.
7. Harrison R.G. The Carnegie Curve // Surv Geophys. 2013. V. 34. P. 209–232.
8. Yaniv R., Yair Y., Price C., Katz Sh. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel // Atmospheric Research. 2016. V. 172–173. pp. 119–125.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТМОСФЕРЫ С НЕОДНОРОДНОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

И.А. Репина<sup>1,2,3</sup>, В.М. Степаненко<sup>2,3</sup>, К.В. Барсков<sup>1</sup>, А.Д. Пашкин<sup>1</sup>, Артамонов А.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия, repina@ifaran.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Росси

Экспериментальные работы выполнены при поддержке грантов РФФИ 20-05-00834, 19-05-00547. Анализ результатов выполнялся при поддержке гранта РНФ 21-17-249.

В работе представлен обзор исследований физических механизмов формирования структуры атмосферной турбулентности в прибрежной зоне с горным рельефом. По данным экспериментальных исследований исследуются границы применимости теории подобия Монина и Обухова (ТПМО) над неоднородными ландшафтами на примере прибрежной зоны с горным рельефом; а также роль мезомасштабных атмосферных процессов в формировании турбулентного обмена между атмосферой и морем/сушей в прибрежных зонах.

*Ключевые слова:* неоднородные ландшафты, атмосферная турбулентность, теория подобия Монина-Обухова

The paper presents an overview of studies of the physical mechanisms of the formation of the structure of atmospheric turbulence in the coastal zone with mountainous relief. Based on the data of experimental studies, the limits of applicability of the Monin and Obukhov similarity theory (MOST) over heterogeneous landscapes are investigated on the example of a coastal zone with mountainous relief; as well as the role of mesoscale atmospheric processes in the formation of turbulent exchange between the atmosphere and the sea / land in coastal zones.

*Keywords:* heterogeneous landscapes, atmospheric turbulence, Monin-Obukhov similarity theory

В современных методах вычисления характеристик турбулентного обмена между поверхностью Земли и атмосферой используются теории, базирующиеся на гипотезе статистической стационарности и горизонтальной однородности турбулентного потока. Традиционно применяемые в атмосферном моделировании, энергобалансовых и биогеохимических расчетах параметризации основаны на выводах теории подобия Монина-Обухова (ТПМО, Монин, Обухов, 1954), которая предполагает подстилающую поверхность, обладающую однородным горизонтальным распределением аэродинамической и температурной шероховатости. Несмотря на идеализированность условий ТПМО, эта теория, совместно с теорией Колмогорова о существовании инерционного интервала в спектрах компонент скорости ветра, широко используется для оценок потоков импульса, тепла и влаги, переноса примесей в приземном слое, и в частности, в моделях прогноза погоды и климата как над сушей, так и над морем (Foken 2006). Первые эксперименты для оценки применимости ТПМО проводились над ровной, однородной поверхностью, где основные ее положения, в основном, подтверждались. Но гораздо более распространены неоднородные ландшафты, различные участки которых характеризуются различными альбедо, теплоемкостью, аэродинамическими свойствами.

Неоднородность поверхности суши бывает многих разновидностей и проявляется в широком диапазоне пространственных масштабов. Её многомасштабная природа делает практически невозможным «разре-

шить» всю пространственную информацию непосредственно в геофизическом моделировании или при анализе данных наблюдений (. Масштабы, которые могут взаимодействовать с турбулентными вихрями и средним потоком, варьируются от  $\sim 1$  мм (микромасштаб Колмогорова) до пространственных масштабов, которые могут быть намного больше, чем все интегральные масштабы турбулентности ( $\sim$  несколько км или больше). Таким образом, неоднородность поверхности представляет собой проблему, решить которую с учетом всех масштабов взаимодействия практически невозможно. Но это повсеместная характеристика нашего мира, и она еще более усиливается из-за антропогенных изменений в землепользовании и городского строительства. Поверхностная неоднородность является определяющим фактором развития атмосферного пограничного слоя при морских и городских бризах, при динамике пограничного слоя в местах установки ветряных электростанций, при формировании потоков тепла и испарение над озерами и водохранилищами, а также в обменных процессах над неоднородными сельскохозяйственными территориями или над морским льдом, покрытом трещинами, снежниками и тородами.

Особо следует выделить три группы топографических неоднородностей: относительно небольшие замкнутые пространства, окруженные территорией со значительно более высокими элементами шероховатости – городские площади, поляны в лесу, озера; ступенчатое изменение высоты подстилающей поверхно-

сти (прямая или обратная ступенька) – лесные опушки, прибрежный рельеф; узкие продолжительные туннели – городские, речные и горные каньоны. Одним из самых ярких примеров неоднородного ландшафта является городская среда.

Для разработки параметризаций мелкомасштабных турбулентных процессов в АПС используются определенные методы и концепции, например, осреднение по Рейнольдсу, масштабирование на основе анализа размерности, различные теории подобия. Этот подход хорошо работает на плоской и однородной местности, но в случае неоднородного рельефа применим далеко не всегда. Проходя над орографически неровной территорией, воздушный поток преобразуется, формируя явления, охватывающие все масштабы атмосферных движений. Соответствующие временные масштабы изменяются от секунд (для всплесков турбулентности в устойчиво-стратифицированных потоках) до десятков минут (при формировании конвективных циркуляций) и нескольких дней (фронтальные образования при переходе через крупные горные хребты). Некоторые погодные явления в горах и прибрежных зонах, такие как бризовая и горно-долинная циркуляция, имеют ярко выраженный суточный ход.

Наиболее важным фактором временной и пространственной изменчивости АПС является энергетический баланс поверхности. Он включает радиационный баланс, потоки явного и скрытого тепла в атмосфере и поток тепла через почву. Потоки тепла и влаги (явного и скрытого тепла) обычно оцениваются из специальных так называемых микрометеорологических измерений на некоторой высоте над поверхностью с использованием пульсационного (eddy covariance) или, реже, профильного метода, основанного на градиентных со-

отношениях теории подобия. То есть фактически экспериментально определяемый энергетический баланс характеризует баланс в некотором слое атмосферы, но не на поверхности, поэтому при расчете энергетического баланса используют дополнительные переменные для обозначения накопления энергии в некотором контрольном объеме. При этом измерения показывают, что тепловой баланс не замыкается даже над равнинной и плоской местностью в стационарных погодных условиях – в большинстве экспериментов суммарная энергия солнечного излучения и потоков тепла через поверхность (лед, снег или поверхность почвы) оказывается больше энергии, уносимой турбулентными потоками явного и скрытого тепла, полученными из пульсационных (ЕС) измерений. Но численные модели прогноза погоды и климата постулируют замыкание теплового баланса.

В случае протяженных ландшафтов с элементами неоднородности (горно-долинный рельеф (Grachev et al., 2016), лес (Барсков и др., 2018), городская застройка (Wood et al., 2010), морской лёд (Grachev et al., 2015) прибрежные зоны (Grachev et al., 2018) исследования показывают существенную пространственную изменчивость турбулентности над неоднородным рельефом. Это может и служить причиной незамыкания теплового баланса. В условиях сложной орографии к незамыканию теплового баланса могут приводить следующие факторы: горизонтальная неоднородность, горизонтальная и вертикальная адвекции, влияние наклона поверхности на радиационный баланс, отсутствие слоя постоянных потоков и другие. В качестве примера на (рис. 1) показан тепловой баланс приземного слоя, измеренный в горном рельефе прибрежной зоны Черного моря.

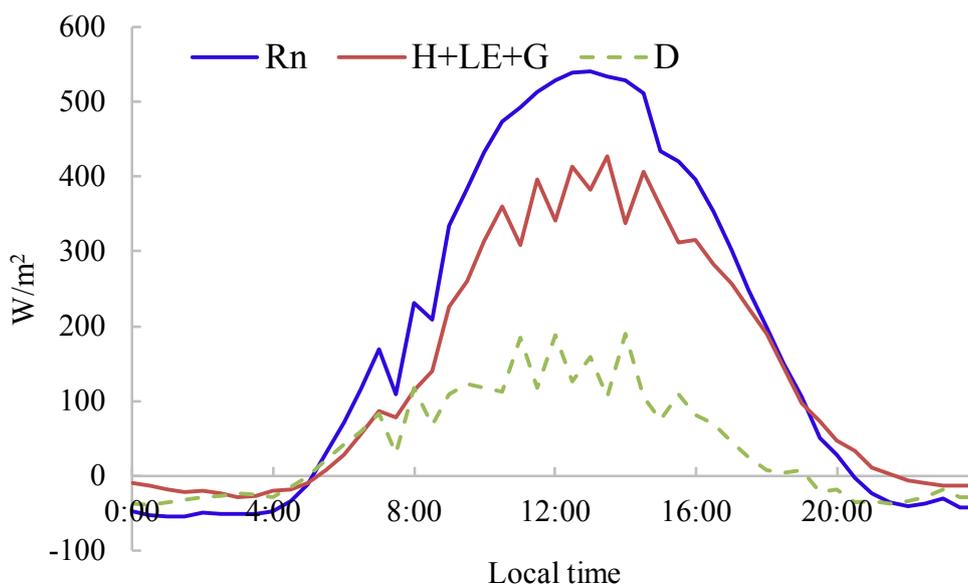


Рис. 1. Суточный цикл составляющих энергетического баланса на участке измерений в горной долине в летнее время в условиях облачности. D - дисбаланс.

Разница между суммарной энергией солнечного излучения и потока тепла через поверхность и суммарной энергией турбулентных потоков явного и скрытого тепла на рисунке значительно превышает неопределенность, которую можно отнести к ошибкам измерений, с чем обычно связывают несходимость баланса при однородном рельефе. В данном случае причиной может быть вертикальная адвекция, но необходимо принимать во внимание и другие составляющие теплового баланса, которые, как правило, не измеряются (например, горизонтальную адвекцию и горизонтальную дивергенцию потока). В случае сложной топографии и пространственной неоднородности подстилающей поверхности на суточный цикл обменных процессов в АПС влияет не только усиление и подавление турбулентности, но также бароклинность, возникающая из-за неоднородного нагрева или охлаждения, что приводит к организованным движениям воздуха, таким как, например, бризы. В горной местности и прибрежных районах бризовые циркуляции возникают из-за тепловых контрастов в масштабе отдельного склона, долины или целого горного хребта. При слабом синоптическом потоке градиенты приземного давления квазигидростатически зависят от температурных возмущений в вышележащей атмосфере. Следовательно, тепловые ветровые циркуляции обычно имеют максимальную интенсивность у поверхности, где градиенты давления наиболее сильны. Эти ветровые потоки, в частности склоновые кататические и долинны ветры, в условиях хорошей погоды являются важной характеристикой динамики атмосферы в горных регионах и вместе с турбулентным перемешиванием управляют процессами обмена. Еще одно различие между АПС над плоской и однородной местностью и над горами состоит в том, что из-за сильных горизонтальных градиентов метеопараметров, вертикальные обменные процессы перестают быть определяющими, а значимым становятся и горизонтальный перенос.

Основной задачей эксперимента была проверка гипотезы, что непостоянство турбулентных потоков по высоте – нарушение одного из основных предположений теории подобия Мони́на Обухова – может происходить в неоднородном ландшафте, по меньшей мере, по двум причинам. Во-первых, смена ландшафта «берег-море» может вызывать горизонтальную неоднородность структуры турбулентности внутри ландшафта, например, связанную с наличием мезомасштабных циркуляций. Во-вторых, поток тепла или импульса может переноситься турбулентными пульсациями сверху из внешнего пограничного слоя, что также приводит к непостоянству потоков по высоте внутри ландшафта. Кроме того, проверялось предположение, что в неоднородном ландшафте существуют различные режимы турбулентного течения, в которых пространственное распределение турбулентных статистик может как кардинально отличаться от распределения в однородном приземном слое, так и приближаться к нему, при этом режимы контролируются течением во внешнем для ландшафта пограничном слое.

Анализ результатов измерений подтвердил ранее полученный теоретический вывод о генерации кинетической энергии турбулентности сдвигом скорости ветра на ступеньке на переходе «горы-море». Согласно измеренным турбулентным потокам при ветрах с моря с теорией подобия Мони́на-Обухова существенно зависит от режима натекающего потока: наибольшее расхождение наблюдается в условиях устойчивой стратификации, при теплой адвекции сверху и турбулентной диффузии отрицательного потока тепла к поверхности. Из-за несоответствия небольшой скорости ветрового потока и степени его турбулизации, расчеты по теории подобия Мони́на-Обухова (ТПМО) показывают заниженные по модулю значения турбулентных потоков. Когда турбулизация атмосферы значительна, сильное вертикальное перемешивание приводит к значительному потоку тепла, направленному из атмосферы к поверхности (отрицательный поток). Из-за неоднородного перемешивания слой постоянных потоков в этом случае отсутствует, что затрудняет использование теории подобия для их расчетов.

Благодаря проведенным исследованиям был сделан вывод, что затруднения применимости ТПМО над неоднородными ландшафтами связано, прежде всего, с тем, что к локальному турбулентному перемешиванию, вызванному высокочастотной турбулентностью, здесь добавляются нелокальные процессы, обусловленные неоднородностью генерации турбулентных движений и различными мезомасштабными циркуляциями. При определенных условиях ТПМО применима и над неоднородной поверхностью, но для расчета характеристик атмосферной турбулентности в этом случае необходим более общий подход, который может содержать, в том числе, и классическую ТПМО как частный случай. Реализация этого подхода возможна с включением в функции подобия новых независимых безразмерных групп или введением новых эмпирических масштабов.

## Литература

1. Мони́н А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Труды ГЕОФИАН. 1954. № 24 (151). С. 163–187.
2. Foken T. 50 years of the Monin–Obukhov similarity theory // *Boundary-Layer Meteorol.* 2006. V. 119, No 3. pp. 431–447.
3. Grachev A.A., Leo L.S., Di Sabatino S., Fernando H.J.S., Pardyjak E.R., Fairall C.W. Structure of turbulence in katabatic flows below and above the wind-speed maximum // *Boundary-Layer Meteorol.* 2016. V. 159. No 3. pp. 469–494.
4. Барсков К.В., Глазунов А.В., Репина И.А., Степаненко В.М., Лыкосов В.Н., Маммарелла И. О применимости теории подобия для устойчиво-стратифицированного атмосферного пограничного слоя над поверхностями сложной структуры // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2018. Т. 54. № 5. С. 544–554.

5. Wood C.R., Lacser A., Barlow J.F., Padhra A., Belcher S.E., Nemitz E., Helfter C., Famulari D., Grimmond C.S.B. Turbulent flow at 190 m height above London during 2006–2008: 952 A climatology and the applicability of similarity theory // *Boundary-Layer Meteorol.* 2010. V. 137. No 1. pp.77–96.
6. Grachev A.A., Andreas E.L., Fairall C.W., Guest P.S., Persson P.O.G. Similarity theory based on the Dougherty-Ozmidov length scale // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2015. V. 141. No 690A. pp. 1845–1856.
7. Grachev A.A., Leo L.S., Fernando H.J., Fairall C.W., Creegan E., Blomquist B.W., Christman A.J. Hocut C.M. Air–Sea/Land Interaction in the Coastal Zone // *Boundary-Layer Meteorology.* 2018. V. 167. No 2. pp. 181–210.

УДК 551.501.777(23.0)(575.2)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ГОДОВЫХ СУММ ОСАДКОВ ПО ТЕРРИТОРИИ КЫРГЫЗСТАНА

М.О. Рыскаль<sup>1</sup>, Д.В. Рыскаль<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Бишкекский Авиационный Метеорологический Центр, «ГП» Кыргызаэронавигация, Аэропорт «Манас»,  
Бишкек, Кыргызстан*

<sup>2</sup>*Australian Gold and Copper, Бишкек, Кыргызстан, denis.ryskal88@gmail.com*

В статье производится сравнительный анализ годовых суммы осадков за многолетний период по территории Кыргызстана с использованием полученных приведенных сумм осадков по спутниковому алгоритму TMPA, данных реанализа ERA-5, а также эталонных наземных инструментальных наблюдений. Оказалось, что наиболее точными в настоящее время являются приведенные спутниковые данные, хорошо описывающие суммы осадков по каждому климатическому региону Кыргызстана, данные моделирования же показали существенное завышение годовых сумм осадков, особенно для высокогорных территорий. Это обусловлено в первую очередь тем, что они содержат небольшое количество исходных наземных наблюдений, а также не включают в себя учет орографического фактора.

*Ключевые слова:* Кыргызстан, годовые суммы осадков, приведенные спутниковые и наземные данные, данные реанализа ERA-5, сравнительный анализ.

Comparative analysis of annual precipitation amounts for a long-term period over the territory of Kyrgyzstan with the usage of adapted satellite TMPA precipitation amounts, ERA-5 reanalysis data, as well as ground-based instrumental observations was executed. It was proved that the most accurate is the adapted satellite data that describes well the precipitation amounts for each climatic region of Kyrgyzstan, while the ERA-5 reanalysis data showed a significant overestimation of the annual precipitation amounts, especially for high-altitude areas. First of all, it can be explained by a small amount of initial ground-based observations, and don't include the orographic factor.

*Keywords:* Kyrgyzstan, annual precipitation amounts, adapted satellite and ground data, ERA-5 reanalysis data, comparative analysis.

### Введение, актуальность

Баланс водных ресурсов Кыргызской республики, включающих в себя многочисленные ледники, озера и реки, напрямую зависит от количества выпадающих атмосферных осадков. Таким образом, точное знание их годового количества может существенно помочь корректной оценке ее водных ресурсов. Актуальность таких данных не вызывает сомнения, ведь дефицит воды уже сейчас представляет собой серьезную проблему, особенно для аридных регионов Средней Азии.

Изучение атмосферных осадков для орографически сложных высокогорных территорий, каковой является Кыргызстан, требует специального подхода, поскольку поле осадков здесь особенно неоднородно и фрагментировано. На сегодняшний день технический прогресс в областях мониторинга, расчета и моделирования различных метеорологических параметров предоставляет исследователям многообразие исходных данных. Од-

нако точное представление о количестве выпадающих осадков могут предоставить лишь наземные инструментальные измерения, которые во всем мире принимаются как эталон, но для того, чтобы охватить наблюдениями всю территорию республики, необходима очень густая сеть метеорологических наблюдений. После 1990 г. сеть станций и постов Кыргызгидромета сократилась почти втрое, и нет предпосылок для ее существенного расширения в ближайшее время. Из ныне действующих 35 МС большинство расположены до высоты 2,5 км – в низкогорном и среднегорном поясе, и лишь 5 метеостанций находятся в высокогорных районах с превышениями более 2,5 км. При этом около 94 % территории Кыргызстана находятся на высотных отметках более 1 км, а 41 % площади превышают 3 км (Атлас Кирг. ССР, 1987; Подрезов, 2014). Таким образом, обширные высокогорные территории республики на данный момент крайне скудно освещены метеоро-

логическими наблюдениями. Исключительная орографическая неоднородность территории и недостаточность прямых наблюдений по наземной сети станций делают проблему изучения осадков здесь особенно сложной. В такой ситуации естественным выходом из положения является привлечение современных спутниковых данных по осадкам, а также данных глобального реанализа. Для объективной оценки количества атмосферных осадков, в первую очередь необходимо выбрать наиболее достоверный источник информации об этом крайне изменчивом во времени и пространстве метеопарамetre, чему и посвящено настоящее исследование.

### **Исходные данные и методика исследования**

Для определения пространственных закономерностей распределения средних годовых сумм осадков по орографически сложной горной территории Кыргызстана нами были использованы три вида исходных данных: 1) карта многолетних наземных измерений, представленная в Атласе Киргизской ССР (Пономаренко, 1987), 2) карта приведенных спутниковых данных по спутниковому алгоритму TMPA-3B43, полученная нами ранее (Рыскаль, 2020), 3) карта, построенная нами по данным реанализа ERA-5 (Архив климатических данных CDS), представляющая собой продукт моделирования поля осадков. Теперь остановимся кратко на каждом виде исходных данных.

Карта многолетних наземных измерений осадков была опубликована в 1987 году, автором ее является П.Н. Пономаренко, который впервые подробно описал территориально-высотные закономерности режима осадков в своей монографии «Осадки Киргизии» (Пономаренко, 1976). Для построения карт осадков, представленных в Атласе Киргизской ССР, были использованы данные 86 гидрометеорологических станций, 212 осадкомерных постов и 62 суммарных осадкомеров. Дополнительно для высокогорной зоны использовались уравнения связи летней температуры воздуха с таянием ледников на их границе, и в целом использовались многолетние геоботанические и почвенные карты республики.

Карта приведенных годовых сумм осадков основывается на найденных корреляционно-регрессионных зависимостях современных спутниковых данных TMPA-3B43 с данными наземных наблюдений, и была получена в результате нашего исследования (Рыскаль, 2020). Используемый спутниковый алгоритм TMPA-3B43 (V6) обладает хорошим пространственно-временным разрешением –  $0,25 \times 0,25^\circ$ , каждые 3 часа, так, что территории Кыргызстана соответствует 351 точка. Нами использовался период с 1998 по 2014 г., исходные данные в виде месячных сумм осадков были взяты с официального сайта Национального Авиационного и Космического Агентства – NASA. Этот алгоритм хорошо зарекомендовал себя во многих регионах Земли, однако, необходимо подчеркнуть, что использование этих данных в горных районах требует решения ряда дополнительных задач по адаптации и специальному

приведению спутниковых данных к орографическим условиям конкретного региона. Такая работа была проведена нами в диссертационном исследовании, она включала в себя следующие основные шаги: 1) разработка специальной методики адаптации или подбора наиболее подходящих спутниковых точек для каждой метеостанции, которая позволила повысить точность исходных данных, 2) проведение валидации адаптированных годовых и сезонных сумм осадков, получаемых по алгоритму TMPA, с использованием в качестве меры расхождения СКО, показавшая возможность его успешного применения в горных районах Кыргызстана, 3) расчет статистических зависимостей адаптированных спутниковых данных с наблюдениями метеостанций, анализ которых показал возможность их последующего приведения к наземным данным, 4) разработка технологии практического приведения спутниковых данных по найденным статистическим зависимостям и получение итоговых результатов в виде приведенных к наблюдениям метеостанций оценок годовых и сезонных сумм осадков, а также, построенные при помощи геоинформационной программы QGIS карты осадков для всей территории Кыргызстана. Таким образом, была получена и используемая в настоящем исследовании карта приведенных годовых сумм осадков. Основным преимуществом полученных по предложенной нами технологии приведенных сумм осадков является то, что в процессе их расчета использовались лишь значимые уравнения регрессии (со статистической значимостью на уровне доверительной вероятности 0,95, которая проверялась по F-критерию Фишера), всего было получено 96 таких уравнений, а также индивидуальный подход в расчете приведенных сумм осадков для каждой климатической провинции и высотной зоны.

Для сравнительного анализа были использованы данные реанализа модели ERA-5, которые имеют пространственное разрешение  $0,1 \times 0,1^\circ$ , территории Кыргызстана соответствует 2150 точек сетки. Реанализ ERA-5 объединяет данные моделирования с глобальными наблюдениями, основываясь при этом на физических закономерностях. Данные ERA-5 позволяют получить информацию о климате прошлого, начиная с 1981 года до настоящего времени, и находятся в свободном доступе на сайте Архива климатических данных – (CDS). В настоящей статье использовались данные реанализа в виде средних месячных сумм осадков с 1998 по 2014 год для лучшей сопоставимости их с приведенными спутниковыми значениями. Популярность использования данных реанализа заключается в их доступности и хорошем пространственно-временном покрытии, однако необходимо учитывать, что эти сеточные данные являются эмпирическими, т. е. рассчитанными различными гидродинамическими моделями.

### **Обсуждение результатов исследований**

В Кыргызстане можно выделить 4 климатические провинции (Подрезов, 2014), имеющие значительную общность в режиме осадков – Северный, северо-запад-

ный Кыргызстан (ССЗК), Юго-западный Кыргызстан (ЮЗК), Иссык-Кульская котловина (ИКК) и Внутренний Тянь-Шань (ВТШ), – в каждой из которых прослеживаются не одна, а целая система своих высотных закономерностей увеличения осадков в зависимости от конкретных орографических условий. В связи с этим дальнейший сравнительный анализ качества различных видов данных будет проведен для каждой климатической провинции.

В табл. 1 показаны полученные по описанной выше технологии приведенные к показаниям метеостанций спутниковые суммы средних годовых осадков по Кыргызстану в целом и для 4 его климатических провинций (Рыскаль, 2020). В ней даны интегральные показатели увлажнения Кыргызстана за исследуемый 16-летний период в виде средних, максимальных и минимальных сумм осадков.

Таблица 1. Статистические характеристики средних годовых сумм осадков (мм) по приведенным спутниковым данным для Кыргызстана в целом и для отдельных провинций.

Вид данных	Кыргызстан	ССЗК	ЮЗК	ИКК	ВТШ
Среднее	495	549	593	486	398
Максимум	1312	741	1312	629	827
Минимум	136	441	303	136	261

Как видно (табл. 1), для отдельных климатических провинций и в целом для республики характерно следующее распределение интегральных характеристик увлажнения по приведенным спутниковым данным. В среднем для территории Кыргызстана, которая находится на границе умеренного и субтропического пояса, приведенные среднегодовые суммы составляют 495 мм, максимальная сумма осадков за год – 1312 мм (западные склоны Ферганского хребта), минимальная же сумма осадков соответствует крайней западной части ИКК и составляет всего 136 мм (условия пустыни). По отдельным климатическим провинциям распределение осадков выглядят следующим образом. ССЗК является северной периферийной областью Тянь-Шаня с субширотными хребтами-барьерами, ориентированными касательно к влагонесущим потокам. Поэтому здесь отмечаются умеренные осадки, увеличивающиеся с высотой места с годовыми суммами в пределах 440–740 мм. Больше всего осадков выпадает в ЮЗК, в среднем 593 мм. Регион характеризуется периферийными субмеридиональными хребтами-барьерами (кроме южного горного обрамления Ферганы, где хребты субширотны), наветренными по отношению к влагонесущим потокам. Таким образом, эти хребты оказываются хорошо увлажненными (до 1300 мм) за счет влагосодержащих западных и юго-западных воздушных течений. Наименьшее количество осадков выпадает в замкнутой Иссык-Кульской котловине, в основном это летние конвективные осадки, в среднем здесь выпадает 486 мм,

при этом их количество увеличивается при смещении с запада (136 мм) на восток (630 мм). ВТШ – высокая, блокированная внешними хребтами область, где наблюдается размывание фронтальных систем в процессе их переваливания через высокие периферийные хребты, поэтому в этой провинции наблюдается уменьшение сумм осадков, в среднем за год здесь выпадает около 400 мм. Таким образом, влияние орографии и высоты, как главных действующих факторов, обуславливающих всю сложность территориально-высотного распределения осадков в Кыргызстане, всегда прослеживается в их тесной взаимосвязи, так что при практическом анализе требуется со всей тщательностью учитывать конкретный вклад каждого из них (Рыскаль, 2020).

Теперь рассмотрим подробнее, посредством сравнительного анализа, карты годовых сумм осадков по многолетним наземным измерениям (рис. 1), по приведенным спутниковым данным TMPA (рис. 2), а также по данным реанализа ERA-5 (рис. 3). В процессе сравнительного анализа мы будем принимать многолетние климатические данные, представленные на рис. 1 как эталон, поскольку они основаны на длительном периоде наблюдений и довольно большом количестве наземных измерений.

Как видно из рис. 2, карта приведенных средних годовых сумм осадков за период 1998–2014 гг. и качественно, и количественно хорошо отражает полученную в работах (Пономаренко, 1976, 1987) картину многолетнего распределения осадков по Кыргызстану. На ней четко отражены области наиболее высоких значений осадков, соответствующие склонам Ферганского и Угамского хребтов, повышенные суммы осадков в гребневой зоне северных передовых хребтов Тянь-Шаня, а также в высокогорных областях Внутреннего Тянь-Шаня. Одновременно на ней хорошо отражена область наиболее их низких значений в западной части ИКК. По данным реанализа ERA-5 (рис. 3) видно, что средние годовые суммы осадков находятся здесь в гораздо более высоком диапазоне (300–2400 мм) по сравнению с картами наземных измерений, а также приведенных спутниковых данных (100–1400 мм). Поля осадков по данным реанализа вытянуты преимущественно широтно, и плохо отражают фактические закономерности территориального распределения осадков.

Численно картина годового распределения осадков по отдельным климатическим провинциям и высотным зонам по этим картам выглядит следующим образом. В ССЗК приведенные величины годовых осадков (рис. 2) растут от подгорной равнины и подножий, где они составили 400–600 мм к высокогорной и нивальным зонам до 800–1000 мм. Это хорошо согласуется со средним распределением осадков, отраженным на картах Пономаренко (350–1050 мм). По данным реанализа (рис. 3) количество осадков на подгорной равнине и подножьях склонов Кыргызского хребта в целом немного выше – от 350 до 900 мм, и существенно больше для высокогорной зоны – до 1600–1800 мм. Особенно не правдоподобным кажется пик осадков 1800 мм по восточной части ССЗК, тогда как по наземным данным здесь не отмечалось более 800 мм (Рыскаль, 2020).

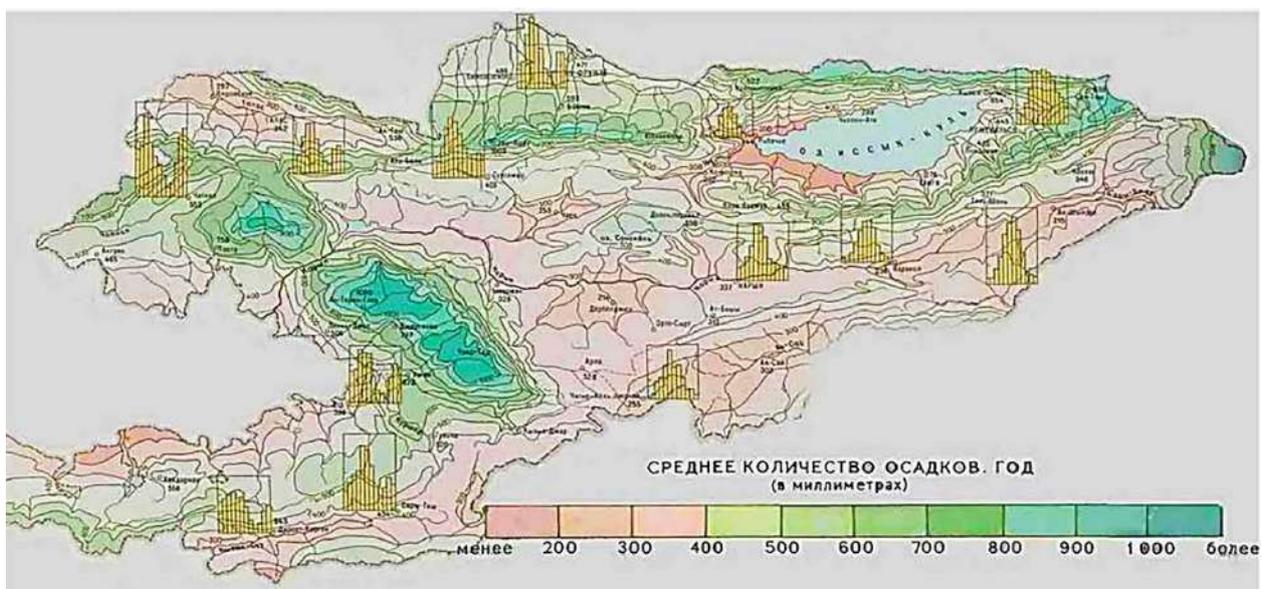


Рис.1. Карта средних годовых сумм осадков для Кыргызстана (Пономаренко,1987).

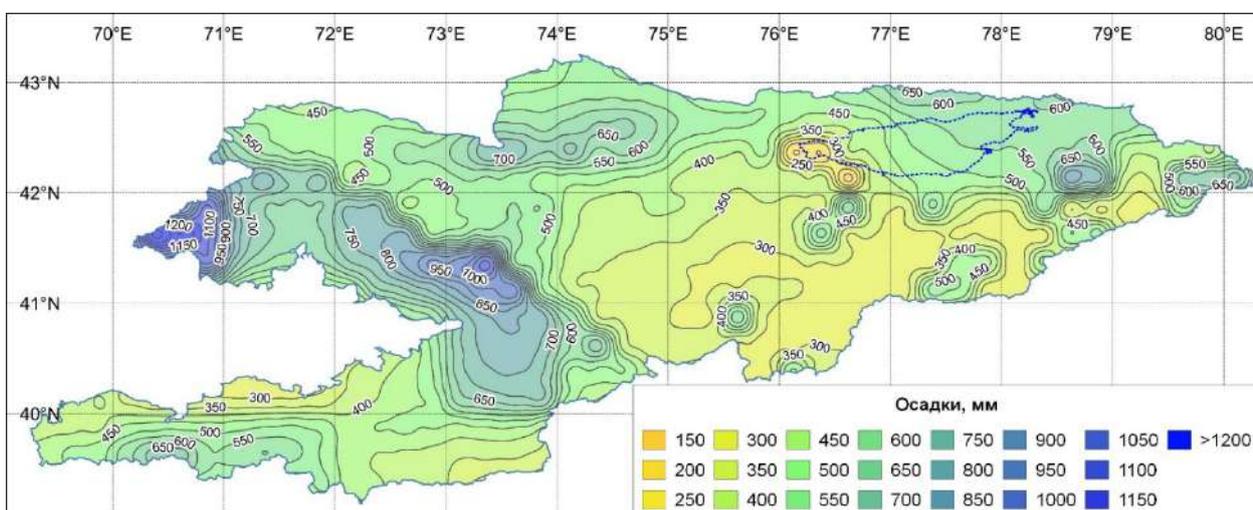


Рис. 2. Карта средних годовых сумм осадков после приведения исходных спутниковых данных к показаниям наземных метеостанций (Рыскаль, 2020).

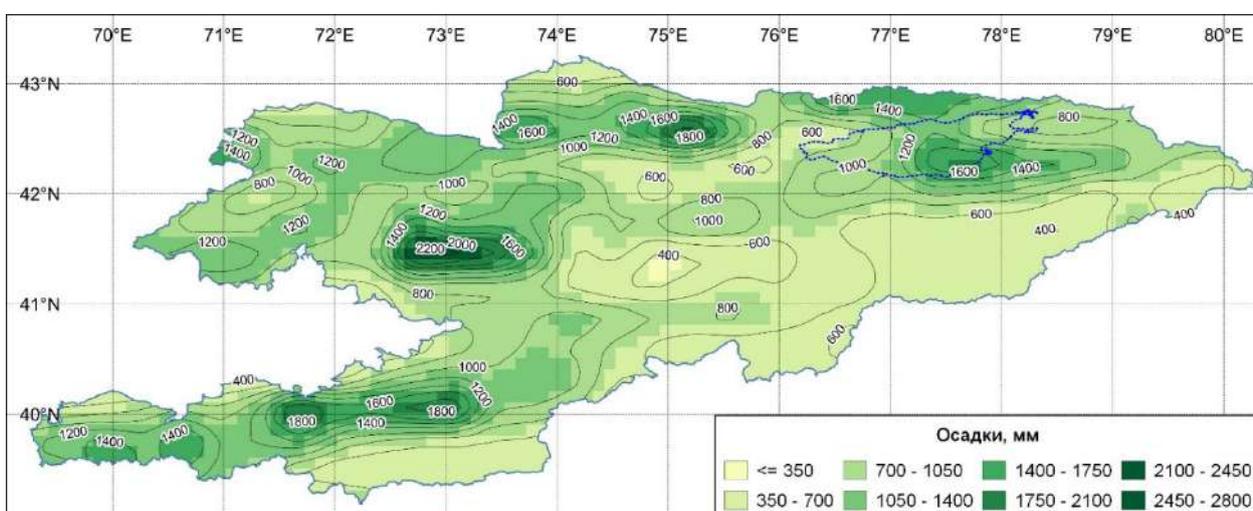


Рис. 3. Карта средних годовых сумм осадков по данным реанализа ERA-5.

Для ЮЗК приведенные среднегодовые осадки (рис. 2) в пределах предгорной зоны составили 200–500 мм и увеличиваются до максимальных значений в гребневой зоне по склонам окружающих хребтов в зависимости от их ориентации. Так, на северо-западе ЮЗК на передовых хребтах-барьерах Угамском и Ферганском осадки возрастают в гребневой зоне до 1300 мм. На южных Туркестанском и Алайском хребтах, которые более высокие, но ориентированы касательно к влагонесущим потокам, увеличение осадков также значительно, но меньше – до 850 мм. Видно, что отражены и небольшие суммы осадков в замкнутой Алайской долине (250–400 мм). Все это хорошо согласуется с многолетними наземными данными, так, согласно рис. 1, на склонах хребтов северного и восточного горного обрамления Ферганы многолетние значения годовых осадков находятся в диапазоне 300–1200 мм, при этом наибольшие значения сумм осадков по наземным данным не только по ЮЗК, но и по всему Кыргызстану регистрируются на МС Ак-Терек-Гава. На хребтах южного обрамления осадки по приведенным данным находятся в диапазоне 250–800 мм. По данным реанализа ERA-5 (рис. 3) средние значения годовых осадков по склонам хребтов ЮЗК возрастают в существенно большем пределе от 200 до 2400 мм. И лишь для крайней северо-западной части ИКК (Пскемский, Чаткальский, Кураминский хребты) значения сумм осадков хорошо соответствуют приведенным спутниковым данным, меняясь от 600 до 1200 мм. Для районов МС Ак-Терек-Гава по данным реанализа поле повышенных сумм осадков пространственно несколько похоже на поле приведенных спутниковых значений (рис. 2), однако количественно осадков здесь отмечается в два раза больше. Также существенно завышены суммы осадков на хребтах южного обрамления Ферганской долины (1000–1800 мм).

Для ИКК приведенные значения среднегодовых сумм осадков (рис. 2) увеличиваются в днище котловины при смещении с запада от менее 140 до 500 мм на восток. Также годовые суммы осадков возрастают от подножий к гребневой зоне окружающих хребтов до 700 мм. Карта среднегодовых осадков (рис. 1) дает здесь их увеличение к гребневым зонам хребтов до 600–800 мм. По данным ERA-5 (рис. 3) не выявлено существенной зависимости увеличения осадков с высотой, однако в целом осадки также имеют тенденцию увеличения с запада на восток, но суммы осадков значительно больше и меняются от 600 до 1600 мм, что далеко от достоверной картины.

Во ВТШ приведенные среднегодовые суммы осадков (рис. 2), увеличивались с высотой по склонам хребтов от 250–350 мм в среднегорных и высокогорных котловинах и до 600 мм в гребневой зоне южных и западных хребтов. Для восточной части этой провинции для высот более 4 км осадки наблюдаются в диапазоне 500–850 мм. Эти данные находятся в хорошем согласии с многолетними климатическими наблюдениями, по которым максимум осадков достигает 900 мм в крайней восточной части провинции, в высокогорных

областях Внутреннего Тянь-Шаня - массивах Ак-Шийрак, Хан-Тенгри и др. (рис. 1). По данным реанализа ERA-5 (рис. 3) осадки для этой провинции меняются в пределах от 350 мм (центральная часть ВТШ) до нереально высоких значений в 1800 мм (в западной его части). Таким образом, по ERA-5 осадки оказываются существенно завышенными для Суусамырской долины и подветренного восточного склона Ферганского хребта (на 500–1000 мм), и, наоборот, занижены для крайней восточной части ВТШ (районы пика Победы и ледника Иньльчек (на 300–500 мм), по сравнению с наземными и приведенными спутниковыми данными.

## Выводы

Приведенные спутниковые годовые суммы осадков для климатических провинций ССЗК и ЮЗК, включающие наветренные периферийные хребты, имеют высокую степень согласования с фактическими наземными данными. В ИКК и ВТШ они согласуются несколько хуже, но вполне удовлетворительно. В целом построенные нами карты приведенных спутниковых значений годовых сумм осадков дают хорошее согласие с полученной к настоящему времени общей многолетней картиной распределения осадков по территории Кыргызстана. По данным реанализа ERA-5 годовые суммы осадков достоверны лишь для долинных районов ССЗК (Чуйская и Таласская долина) и центральной среднегорной части ВТШ. Для всех остальных регионов эти данные существенно завышают реальное количество атмосферных осадков, в некоторых районах более чем в два раза. Это позволяет сделать вывод о том, что оценки реанализа ERA-5 в большинстве горных районов Кыргызстана неудовлетворительно соответствуют прямым наземным и приведенным спутниковым суммам осадков. Хотя данные реанализа имеют более высокое пространственное разрешение (9 км против 25 км по спутниковым данным TMPA 3B43), а также учитывают осадки, вызванные как крупномасштабными синоптическими процессами, так и локальными конвективными, однако в целом над Кыргызстаном они характеризуются существенными погрешностями. Это может быть объяснено тем, что данные моделирования содержат небольшое количество исходных натурных метеорологических наблюдений, а также не включают в себя учет сложного орографического фактора, поэтому они плохо воспроизводят влияние горной орографии на поле осадков, особенно в высокогорном и нивальном поясе. Манниг (Mannig и др., 2013) также отметил, что по сравнению с сетью наблюдений за осадками более высокого разрешения, такими как GPCC и Aphrodite, распределение осадков, полученное из реанализа ERA40 и NCEP, не выглядит достоверным для Центральной Азии, особенно на горных хребтах. Осадки в целом являются довольно ненадежным продуктом моделирования, поскольку их поля являются весьма неоднородными, особенно для регионов с большими перепадами высот и различным расположением горных хребтов по отношению к влагонесущим потокам. Поэтому для таких сложных гор-

ных территорий необходима обязательная адаптация данных дистанционного зондирования или моделирования атмосферных осадков, которая, например, была показана в нашей работе (Рыскаль, 2020). В итоге, для эффективного использования при решении различных задач прикладной климатологии Кыргызстана нами рекомендуются современные и достоверные данные приведенных спутниковых сумм осадков. Отметим также, что нами (Рыскаль, 2019) были также проверены данные спутникового алгоритма GPM, который является наследником TMPA 3B43, результаты показали хорошую преемственность и рекомендуются нами к приведению по предложенной технологии. Результаты настоящего исследования могут быть полезны при принятии решения об использовании наиболее точного источника информации о годовых суммах осадков с учетом поставленной пользователем цели, а также способа использования данных, и их доступности за требуемый период наблюдений.

### Литература

1. Архив климатических данных CDS [Электронный ресурс]: архив данных о наблюдениях Земли. - URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview> (дата обращения: 10.07.2021).
2. Атлас Киргизской ССР. Том 1. Природные условия и ресурсы. М.: ГУГК СССР, 1987. 157 с.
3. Национальное Авиационное и Космическое Агентство (NASA) [Электронный ресурс]: архив данных о наблюдениях Земли. - URL: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#> (дата обращения: 20.04.2019).
4. Подрезов О.А. Горная климатология и высотная климатическая зональность Кыргызстана. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2014. 170 с.
5. Пономаренко П.Н. Атмосферные осадки Киргизии /под ред. О.А. Дроздова. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 134 с.
6. Рыскаль М.О. Оценка сумм осадков на территории Кыргызстана по данным спутниковых наблюдений. Дис. канд. географ. наук: 25.00.30. Бишкек, 2020. 173 с.
7. Рыскаль М.О., Павлова И.А. Сравнительная оценка сумм осадков для аэродрома «Манас» по спутниковым и наземным данным за период 1998-2017 гг. Бишкек: Вестник КРСУ, 2019. Том 19. № 4. С. 131–138.
8. Mannig, B., Müller M., Starke E. Dynamical downscaling of climate change in Central Asia // Global and Planetary Change. 2013. V.110. pp. 24–37.

УДК 551.324 +551.501.776

## ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА КЛИМАТО-РЕКРЕАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ В КУЗНЕЦКО-САЛАИРСКОЙ ОБЛАСТИ В СОВРЕМЕННЫЙ ПЕРИОД

В.В. Севастьянов

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, vvs187@mail.ru*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-45-700010 p\_a.

В статье приведены методы оценки климатических ресурсов для рекреационной деятельности. Комплексные показатели необходимы для выявления перспективных местностей для организации рекреационной и лечебно-оздоровительной деятельности. Квалиметрический метод использован при решении задач освоения курортно-рекреационных ресурсов территории Кузнецко-Салаирской горной местности.

*Ключевые слова: биоклимат, рекреационные ресурсы, Кузнецко-Салаирская горная область, комфортность климата*

The article presents methods for assessing climatic resources for recreational activities. Comprehensive indicators are necessary to identify promising areas for the organization of recreational and health-improving activities. The qualimetric method is used in solving the problems of developing resort and recreational resources of the territory of the Kuznetsk-Salair mountain area.

*Keywords: bioclimate, recreational resources, Kuznetsk-Salair mountain region, climate comfort*

С целью курортно-рекреационного освоения какой-либо территории необходима оценка степени благоприятности всех составляющих природно-климатических ресурсов (климатических и биоклиматических показателей, бальнеологических факторов, ландшафтно-растительных ресурсов, гидрологических условий, орографии, почвы, инженерно-геологических явле-

ний, санитарно-гигиенической ситуации, эстетического фактора).

Интегральная квалиметрическая оценка климата заключается в измерении и оценке качества климатических и биоклиматических показателей среды с учетом весомости. Она оценивает большое количество климатических показателей (комплекс тепловых

ресурсов, скорость ветра, характеристики снежного покрова). Данная оценка является наиболее полной и определяет пригодность территории для курортно-рекреационного освоения.

Определение показателя интегрального качества производится по формуле (1) (Методическое пособие..., 1997):

$$K = \sum_{i=1}^n a_i w_i = a_1 w_1 + a_2 w_2 + \dots + a_n w_n$$

где  $K$  – показатель интегрального качества (безразмерный);

$n$  – количество показателей;

$w_i$  – биоклиматический и климатический показатель;

$a_1, a_2, \dots, a_n$  – весовые коэффициенты в интегральном качестве (Курортно-рекреационный потенциал..., 2002).

Для комплексной оценки территории с целью курортно-рекреационного освоения используются следующие критерии:

– при  $K = K^{эт}$  и  $K > K^{доп}$  – оценка оптимальная, условия благоприятные;

– при  $K^{доп} \leq K < K^{эт}$  – оценка удовлетворительная, условия ограничено благоприятные;

– при  $K < K^{доп}$  – оценка неудовлетворительная, условия неблагоприятные.

Интегральная оценка качества климата проведена по метеорологическим станциям, расположенным в подобластях Кузнецко-Салаирской горной области. Для оценки эколого-климатических показателей в разных районах области проведено сравнение фактического интегрального качества с эталонным ( $K^{эт} - K^{факт}$ ).

Пределы различных климатических и биоклиматических показателей, позволяющих оценить потенциальные возможности климата для курортно-рекреационного освоения, и их весомости приведены в табл. 1.

Для оценки полученного результата проводится сравнение фактического интегрального качества с эталонным значением. Под эталонным значением понимается граничное значение величины, выше (или ниже) которого биоклиматические условия оцениваются как благоприятные. Допустимым для организации курортно-рекреационной деятельности является несколько меньшее (или большее) значение чем эталонное. Ниже допустимого значения биоклиматические условия оцениваются как неблагоприятные.

Таблица 1. Эколого-климатические параметры, их весовые коэффициенты. Эталонные и допустимые значения климатических и биоклиматических показателей (Методическое пособие..., 1997)

Подгруппы первичных свойств	Первичные свойства	Весомость первичного свойства Допустимое	Значение качества		
			Эталонное		
Солнечная радиация	ПСС, ч/год	0,75	1700	1990	
	Период с УФ дефицитом, месяц	0,5	4	2	
	Период возможной гелиотерапии, месяц	0,75	6	12	
Комфортность	Продолжительность безморозного периода, дни	0,50	90	110	
	Число дней с оптимальными погодными условиями, дни/год	0,30	50	70	
	Степень комфортности климата	1,00	0,6	1,1	
	Число дней с $T \geq 15$ °C	0,10	40	80	
	Число дней с $T \leq 10$ °C	0,10	240	200	
Дискомфортность	Скорость ветра за зиму, м/с	0,50	5	3	
	Степень биотропности климата	1,00	1,7	1,0	
	Повторяемость неблагоприятных градаций относительной влажности (<30 % и >80 %) за лето, %	0,50	30	20	
Климато-рекреационный потенциал (КРП)	КРП, балл	6,00	40	60	
	Температура воды, °C	0,50	16	18	
	Высота снежного покрова	H1, см	0,50	15	30
		H2, см	0,50	60	40
	Продолжительность залегания устойчивого снежного покрова, дни	1,00	100	50	

Примечание – ПСС – продолжительность солнечного сияния, часы; T – температура воздуха, °C;

Фактические показатели интегрального качества на всех станциях меньше эталонного, но существенно выше допустимого. При этом можно отметить, что наиболее близкие значения качества к эталонному отмечаются в Горной Шории, вследствие более южного расположения. Здесь климат наиболее комфортен, по отношению к другим районам. Так, в долине реки Кондома (Подкатунь, грива) и в окрестностях станции Междуреченск различия между эталонным и фактическим значением качества составляют 0,022 и 0,024 соот-

ветственно, а на севере области – более 0,040 (табл. 2).

На северо-западе области уменьшается период с температурой выше 15 °С, климато-рекреационный потенциал, увеличивается скорость ветра в зимние месяцы. Это увеличивает различия между эталонными значениями и фактическими. В этом районе наибольшее значение для климатолечения приобретает использование утепленных климатопавильонов, значительно уменьшающие воздействие ветра на тепловой баланс человека.

Таблица 2. Интегральная квалиметрическая оценка комфортности климата Кузнецко-Салаирской горной области

Станция	Фактический показатель интегрального качества, $K_{\text{факт}}$	Эталонный показатель интегрального качества, $K_{\text{эт}}$	Допустимый показатель интегрального качества	$K_{\text{эт}}-K_{\text{факт}}$
Подобласть Кузнецкой котловины				
Кемерово, агро	0,187	0,224	0,089	0,037
Мариинск	0,190	0,224	0,090	0,034
Крапивино	0,185	0,223	0,090	0,038
Кемерово	0,181	0,220	0,091	0,041
Тисуль	0,180	0,222	0,091	0,042
Тяжин	0,181	0,222	0,091	0,041
Новокузнецк	0,195	0,222	0,091	0,027
Ижморск	0,179	0,223	0,090	0,044
Междуреченск	0,200	0,224	0,089	0,024
Тайга	0,182	0,223	0,090	0,041
Кольчугино	0,193	0,226	0,089	0,033
Топки	0,181	0,223	0,090	0,042
Киселевск	0,193	0,226	0,089	0,033
Трудоармейский	0,189	0,227	0,088	0,038
Салаирская подобласть				
Гурьевск	0,190	0,226	0,089	0,036
Красное	0,189	0,226	0,089	0,037
Тогул	0,198	0,230	0,087	0,032
Подобласть Кузнецкого Алатау				
Барзас	0,180	0,211	0,082	0,031
Таштып	0,203	0,233	0,086	0,030
Бея	0,202	0,232	0,086	0,030
Центральный Рудник	0,171	0,223	0,090	0,052
Уйбат	0,202	0,232	0,086	0,031
Неожиданный Прииск	0,198	0,230	0,087	0,032
Коммунар	0,196	0,231	0,087	0,035
Ненастная	0,154	0,223	0,090	0,069
Подобласть Горной Шории				
Кузедеево	0,192	0,223	0,090	0,031
Кондома	0,199	0,230	0,087	0,031
Амзас	0,199	0,231	0,087	0,032
Усть-Кабырза	0,200	0,230	0,087	0,030
Подкатунь, грива	0,197	0,219	0,091	0,022

Согласно проведенной оценке эколого-климатических показателей, комфортность климата Кузнецко-Салаирской области характеризуется как удовлетворительная, т.е. эколого-климатические условия ограниченно благоприятны для курортно-рекреационного освоения.

В верхнем поясе Кузнецкого Алатау (Ненастная, 1183 м) климатические и биоклиматические условия обеспечивают неблагоприятные условия для курортно-рекреационной деятельности. Это происходит за счет сокращения безморозного периода, числа дней с оптимальными погодными условиями, значительной скорости ветра в зимние месяцы, увеличения продолжительности периода с устойчивым снежным покровом (более 200 дней) и значительной высоты снежного покрова.

Таким образом, проведенная интегральная оценка качества климата показала, что более комфортные эколого-климатические условия формируются в предгорных районах горных хребтов южной части Кузнецко-Салаирской области.

На основе полученных эколого-климатических показателей проведена интегральная квалиметрическая оценка комфортности климата, заключающаяся в оценке качества с учетом весомости климатических и биоклиматических показателей среды, определяющих ее пригодность для курортно-рекреационного освоения.

Наиболее комфортные климатические и биоклиматические условия формируются в предгорных районах горных хребтов Кузнецко-Салаирской области. По степени пригодности эколого-климатических показателей для развития санаторно-курортной деятельности, отдыха и туризма в этой горной области выделено три ранга местностей.

К местностям I ранга, особо благоприятным для рекреации и климатолечения, относятся территории, расположенные ниже 500 м над уровнем моря. К ним относятся Горная Шория с горно-таежными ландшафтами, а также южная часть восточного макросклона Кузнецкого Алатау с лесостепными и степными ландшафтами. Такие местности перспективны для курортно-рекреационного освоения с развитием здравниц круглогодичного действия.

К местностям II ранга, благоприятным для курортно-рекреационной деятельности, относятся подобласти Салаирская и Кузнецкая котловина. Сюда входят также местности, расположенные выше 500 м в Горной

Шории. В Кузнецком Алатау на западном макросклоне такие местности выделяются до высоты 1000 м над ур. м., а на восточном макросклоне – в интервале высот 500–1000 м над ур. м. Эти местности пригодны для развития сети курортно-рекреационных объектов с сезонным климатолечением в сочетании с различными видами бальнеотерапии.

В верхнем поясе гор Кузнецкого Алатау (выше 1000 м над ур. м.) выделяются местности III ранга, относительно благоприятные, с сезонным проведением рекреационных мероприятий. Курортно-рекреационные объекты в данных местностях должны быть повышенной комфортности.

При анализе перспектив развития курортно-рекреационной деятельности в южных регионах Сибири современные изменения климата играют немаловажную роль. Современная тенденция повышения зимних температур воздуха и уменьшения скорости ветра могут способствовать сокращению числа дней с неблагоприятными погодными условиями для рекреации и лечебно-оздоровительной деятельности в холодный период.

В теплый период года значительных колебаний рассматриваемых метеорологических величин не наблюдается.

Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдающиеся долговременные тенденции изменения климата не будут существенно оказывать влияние на изменение значений эколого-климатических показателей.

## Литература

1. Джабарова Н.К. Перспективы курортно-рекреационного развития юга Сибири / Н.К. Джабарова [и др.] // Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры. 2010. №1. С. 36–38.
2. Интегральная квалиметрическая оценка качества среды для курортных и рекреационных целей: метод. пособие / сост. В.М. Пивкин, О.Ф. Зятева, Э.С. Яковенко [и др.]. Томск, 1997. 54 с.
3. Курортно-рекреационный потенциал Западной Сибири / под ред. Е.Ф. Левицкого, В.Б. Адилова. Томск, 2002. 227 с.
4. Луковская И.А., Севастьянов В.В. Кузнецко-Салаирская область. Климато-рекреационные ресурсы. LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG. Berlin, Leipzig, 2011. 200 с.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ СУММАРНОЙ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Т.К. Скляднева, Б.Д. Белан, М.Ю. Аршинов, Д.К. Давыдов, А.В. Козлов, А.В. Фофонов

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия  
tatyana@iao.ru, bbd@iao.ru, michael@iao.ru, denis@iao.ru, artem@iao.ru, alenfo@iao.ru*

Исследование выполнено за счет гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №19-05-50024). Для выполнения исследований использовалась инфраструктура ИОА СО РАН (включая ЦКП «Атмосфера»), созданная и эксплуатируемая по госзаданию.

Дано описание и технические характеристики радиационного блока постов измерения атмосферных параметров в приземном слое атмосферы на территории Томской области. Анализируются результаты измерения суммарной солнечной радиации ( $\lambda = 0,3 \div 2,8$  мкм) в период с 1995 по 2020 гг. Показано, что рассматриваемый период на территории Томской области характеризуется устойчивым радиационным режимом. Коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации не превышает 5%. В Томске среднегодовое поступление суммарной солнечной радиации составило  $3783 \pm 212$  МДж/м<sup>2</sup>.

*Ключевые слова: солнечная радиация, мониторинг*

In this report, a description and technical characteristics of the installation for measurements of the solar radiation at the stationary posts that describe the state of the surface layer of the atmosphere over Tomsk region is contained. The results of measuring the total solar radiation ( $\lambda = 0,3 \div 2,8$   $\mu\text{m}$ ) in the period from 1995 to 2020 are analyzed. It is shown that the period under consideration on the territory of the Tomsk region is characterized by a stable radiation regime. The coefficient of variation of annual incoming solar radiation does not exceed 5%. In Tomsk, the average amount of annual incoming solar radiation was  $3783 \pm 212$  MJ / m<sup>2</sup>.

*Keywords: Solar radiation, monitoring*

В настоящее время одним из важнейших вызовов стоящим перед человечеством является Глобальное потепление. Формирование термического режима обусловлено рядом факторов, один из которых – вариации потоков солнечной радиации. Уровень и вариации входящей солнечной радиации зависят от физико-географических и климатических особенностей региона. На основе анализа изменений радиационных потоков и факторов, определяющих их приход и перераспределение в атмосфере в (Горбаренко, 2016) показано, что с середины 1990-х годов многие радиационные параметры приобрели тенденции, отличные от тенденций, наблюдавшихся в прошлые годы. Для некоторых параметров они существенны и сохраняются на протяжении длительного периода и, следовательно, являются климатически значимыми.

Анализ пространственно-временной изменчивости солнечной радиации на территории Западной Сибири, проводился на основе данных многолетнего непрерывного мониторинга в приземном слое атмосферы с 1995 гг. по настоящее время.

Пункты наблюдения на территории Томской области:

а) TOR-станция ИОА СО РАН ( $56^{\circ}28'$  с.ш.,  $85^{\circ}03'$  в.д.) (Davydov et al, 2019) и базовый экспериментальный комплекс (БЭК) на восточной окраине г. Томска;

б) обсерватория «Фоновая», расположенная в 60 км к западу от города на берегу р. Оби ( $56^{\circ}25'$  с.ш.,  $84^{\circ}04'$  в.д.) (Antonovich et al, 2018);

в) Карасево ( $58^{\circ}14'47''$  с.ш.,  $82^{\circ}25'16,2''$  в.д.) и Березоречка ( $56^{\circ}08'48''$  с.ш.  $84^{\circ}19'50''$  в.д.), входящие в

состав российско-японской сети мониторинга парниковых газов «JR-STATION» развернутой на территории Западной Сибири (Watai et al, 2010).

Территория обсерватории «Фоновая» окружена смешанным лесом (березы, осины и сосны обыкновенные). Большая площадь между станцией и городом Томском покрыта хвойными деревьями. Крупных промышленных объектов вблизи обсерватории не имеется. Пост «Березоречка» окружен березовым лесом, а пост «Карасево» расположен на берегу озера и окружен смешанным лесом.

Однородность ряда измерения суммарной радиации обеспечивается использованием однотипных приборов и одинаковой методики поверки. Автоматические и непрерывные измерения суммарной радиации ведутся пиранометром KIPP&Zonen Model CM3 (спектральный диапазон измерения  $0,305\text{--}2,8$  мкм). На TOR-станция с 1995 по июль 2018 гг. измерения суммарной солнечной радиации проводились с помощью пиранометра Ю.Д. Янишевского М-115М (спектральный диапазон  $0,3\text{--}2,4$  мкм), который регулярно поверялся по «образцовому» пиранометру М-115М №313 (проходил калибровку в ЗапСиб УГМС).

Для управления всем измерительным комплексом каждого поста (и в частности его радиационным блоком), а также сбора и передачи данных было разработано оригинальное программное обеспечение (ПО) в среде LabView 8.5. Оно позволяет комплексу аппаратуры работать как в автоматическом, так и в ручном режимах. Автоматический режим реализуется при помощи задания алгоритма измерений. Каждый шаг

алгоритма содержит команду действия и время, по которому должна выполняться последовательность действий. В конце каждого цикла измерений происходит запись всех полученных данных, включая сервисные, в первичную базу данных (БД). Затем через GSM-канал сотовой сети устанавливается соединение с центральным сервером в ИОА СО РАН, после чего все данные, которые были получены на предыдущих этапах, передаются на удаленный сервер, где происходит их запись в основную и резервную БД.

### Результаты

На рис. 1 представлена межгодовая изменчивость поступления суммарной солнечной радиации ( $Q$ ) на

постах измерения за период 1995–2020 гг. Коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации в районе постов не превышал 5 %.

По данным самого длинного ряда наблюдений на TOR-станции в период с 1995 по 2020 гг. увеличение общей и нижней облачности определило тенденцию незначительного спада годового поступления суммарной радиации. Относительная величина тренда в Томске – -2,4 %. Среднегодовой приход суммарной радиации составил  $3783 \pm 212$  МДж/м<sup>2</sup>, с максимальным годовым поступлением  $Q$  в 2003 г. ( $4484$  МДж/м<sup>2</sup>) и минимальным – в 2013 г. ( $3428$  МДж/м<sup>2</sup>).

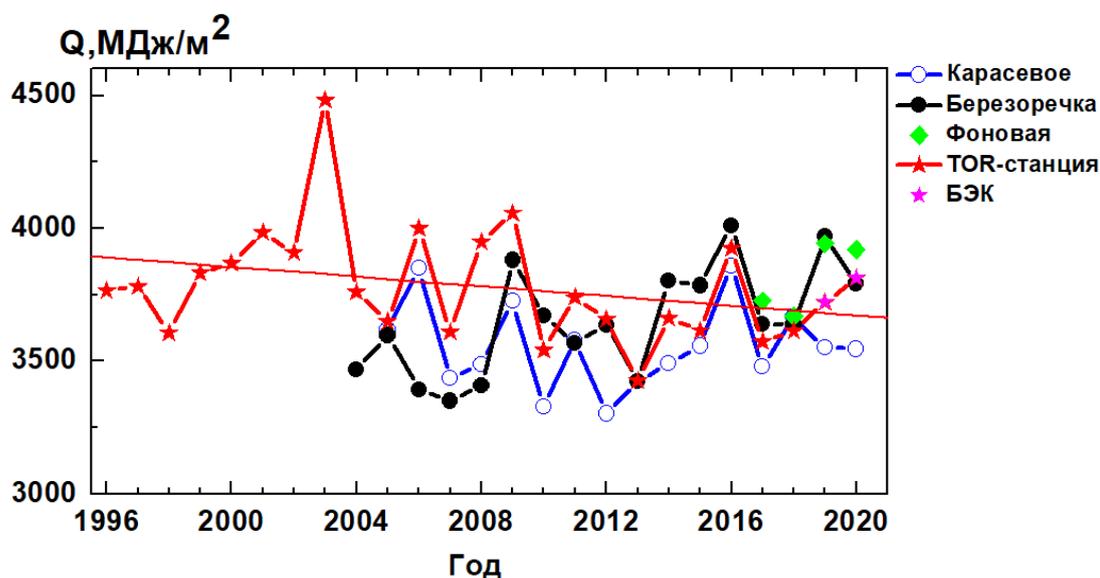


Рис. 1. Межгодовая изменчивость поступления суммарной радиации на постах измерения.

В период 2004–2020 гг. относительная величина тренда на посту «Карасевое», расположенном в центре Томской области, составила -0,2%.

Среднегодовой приход солнечной радиации на территории Томской области за период 2004–2020 гг.:  $3729 \pm 174$  МДж/м<sup>2</sup> (Томск),  $3552 \pm 169$  МДж/м<sup>2</sup> (Карасевое),  $3793 \pm 192$  МДж/м<sup>2</sup> (Березоречка).

Месячный приход суммарной солнечной радиации более изменчив от года к году, чем годовой. Величина и диапазон колебаний месячных сумм радиации зависят от сезона. В весенне-летний период коэффициент вариации месячных сумм  $Q$  меняется от 9 % до 12 %; в осенний период — в пределах 15–17 %, а в зимний период, из-за неустойчивости циркуляционных процессов, возрастает до 20 %. На рис. 2а приведен годовой ход среднемесячного поступления суммарной солнечной радиации на территории Томской области. На всех постах измерения

за рассматриваемый период максимальное месячное поступление суммарной радиации в июне регистрировалось чаще, чем в июле. В районе обсерватории «Фоновая» за период 2016–2020 гг. в апреле и августе месячные суммы  $Q$  больше медианных значений в эти месяцы за весь период наблюдения на TOR-станции (с 1995 г.), в остальные месяцы — близки к медианным значениям. Для поста «Карасевое» картина иная: практически для всех месяцев в период 2004–2020 гг. месячные суммы  $Q$  меньше медианных значений  $Q$  на TOR-станции.

В период 1996–2020 гг. наблюдался слабый положительный тренд  $Q$  в осенне-зимний и летний периоды и отрицательный – в весенний период (рис. 2 б). Из проведенного анализа изменчивости месячных сумм суммарной радиации следует, что более подробное разбиение массива анализируемых данных не целесообразно.

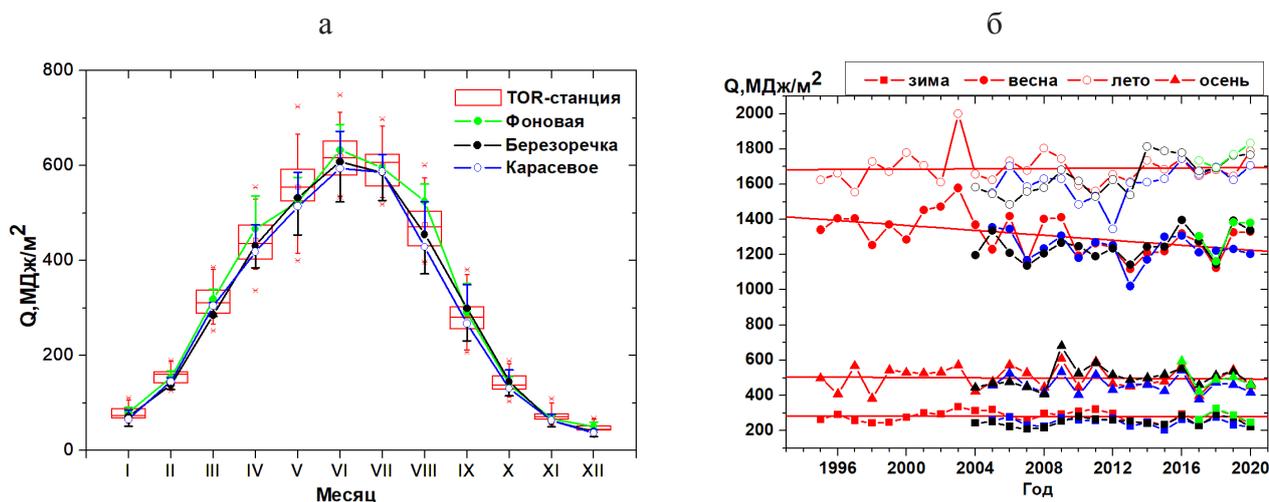


Рис. 2. Изменение месячных сумм суммарной радиации: TOR-станция (1996–2020 гг.), обсерватория «Фоновая» (2016–2020 гг.), Березоречка и Карасево (2004–2020 гг.) (а); изменчивость  $Q$  по сезонам: TOR-станция (красный цвет.), обсерватория «Фоновая» (зеленый.), Березоречка (черный), Карасево (синий) (б).

Суточное поступление суммарной радиации ( $Q_{\text{сут}}$ ) в районе постов измерения на территории Томской области менялось в диапазоне  $0,06 \div 35$  МДж/м<sup>2</sup>. В 40% случаев  $Q_{\text{сут}}$  не превышало 5 МДж/м<sup>2</sup> (рис. 3).

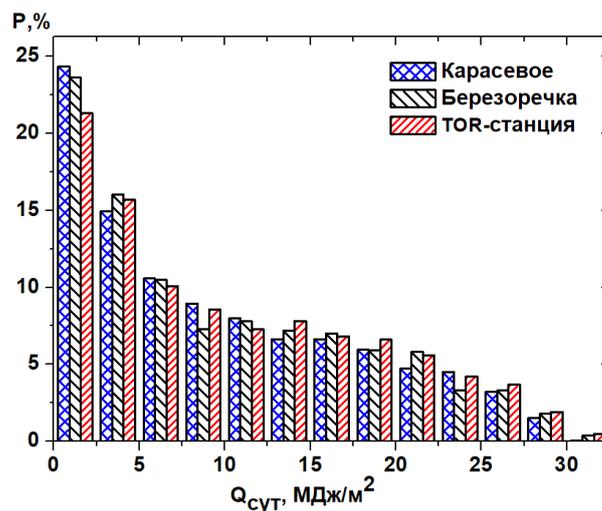


Рис. 3. Повторяемость суточных сумм суммарной солнечной радиации на территории Томской области.

Результаты анализа многолетнего мониторинга солнечной радиации на территории Томской области показали:

1. Период 1995–2020 гг. на территории Томской области характеризуется устойчивым радиационным режимом. Коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации не превышает 5%.
2. Наблюдается отрицательный тренд поступления суммарной радиации в весенний период.
3. В Томске среднегодовое поступление суммарной солнечной радиации составило  $3783 \pm 212$  МДж/м<sup>2</sup>, с максимальным годовым поступлением  $Q$  в 2003 г. ( $4484$  МДж/м<sup>2</sup>) и минимальным – в 2013 г. ( $3428$  МДж/м<sup>2</sup>).

## Литература

1. Горбаренко Е.В. Климатические изменения радиационных параметров атмосферы по данным наблюдений в Метеорологической обсерватории МГУ // Метеор. и гидрология. 2016. №12. С.5–17.
2. Antonovich V.V., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Balin Yu.S., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Kokhanenko G.P., Novoselov M.M., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Chernov D.G., Smargunov V.P., Yausheva E.P., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Pelon J., Machida T., Sasakawa M. Station for the comprehensive monitoring of the atmosphere at Fonovala Observatory, West Siberia: current status and future

- needs // Proceedings of SPIE. 2018. V.10833. CID: 10833 7Z. [10833–189]. doi: 10.1117/12.2504388
3. Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlestin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnaya T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V. Monitoring of Atmospheric Parameters: 25 Years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmospheric and Oceanic Optics. 2019. V. 32. N 2. pp. 180–192.
  4. Watai T., Machida T., Shimoyama K., Krasnov O., Yamamoto M., Inoue G. Development of an Atmospheric Carbon Dioxide Standard Gas Saving System and Its Application to a Measurement at a Site in the West Siberian Forest // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2010. V. 27. N 5. pp. 843–855.

УДК 551.508.99

## ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТЕЛЕЙ

Д.Е. Филатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия,  
dmitrii.04101995@gmail.com

В данной статье рассматривается проблема текущего состояния приборного обеспечения для определения параметров метелей. Кратко описываются виды метелей, их влияние на криосферу, гидросферу и техносферу и основные параметры. Дается описание и сравнение метелемеров, их преимущества и недостатки.

*Ключевые слова:* метель, метелемеры

This article discusses the problem of the current state of instrumentation for determining the parameters of snowstorms. The types of snowstorms, their impact on the cryosphere, hydrosphere and technosphere, and the main parameters are briefly described. The description and comparison of snowstorm meters, their advantages and disadvantages are given.

*Key words:* snowstorm, snowstorm meter

Метели оказывают существенное влияние на различные аспекты жизнедеятельности человека и окружающей среды северных широт. Рассмотрим особенности влияния метелей на такие сферы как криосфера, гидросфера и техносфера с точки зрения приборного обеспечения наблюдений.

При наблюдении погоды на станциях Росгидромета, различают следующие виды метелей (Атмосферные явления):

- Поземок;
- Низовая метель;
- Общая метель.

Позёмок — это горизонтальный снегоперенос ветром с поверхности снежного покрова в слое, достигающего до 2 метров в высоту. Наблюдается данный вид метели и при малооблачной погоде, и в случаях снегопада. К условиям возникновения можно отнести сухой незамерзший снежный покров при скорости ветра от 5 м/с и более.

Низовая метель — это горизонтальный снегоперенос ветром с поверхности снежного покрова, слоем нескольких метров в высоту. Наблюдается данный вид метели и при малооблачной погоде и в случаях снегопада. К условиям возникновения можно отнести сухой несмерзшийся снежный покров и скорость ветра от 7 м/с и более.

Общая метель — интенсивный горизонтальный снегоперенос ветром в приземном слое атмосферы.

Данный процесс достаточно развитый по вертикали, так что невозможно определить состояние неба (количество и форму облаков) и невозможно установить, выпадает снег из облаков или переносится только снег, поднятый с поверхности снежного покрова. Горизонтальная видимость на уровне 2 м обычно составляет от 1–2 км до нескольких сотен и даже до нескольких десятков метров. Возникает обычно при сухом несмерзшемся снежном покрове и скорости ветра 10 м/с и более. Особенно сильную общую метель в разных районах некоторых стран называют буран.

Различные виды метелей влияют на плотность снежного покрова и рельеф. При слабых метелях возникает снежная рябь, наподобие ряби песчаных барханов и песчаных отмелей. При усилении ветра появляются снежные барханы, волны и гряды, медленно перемещающиеся по ветру. Основным типом частиц при поземке и низовой метели являются осколки снежинок, а при общей метели – снежинки. Типы частиц метели, сопровождаемых ветром, влияют на плотность снежного покрова. Так при общей метели образуются толстые слои однородного снега низкой плотности, а при низовой — снег отлагается неравномерно, с различной, иногда очень высокой, плотностью. Также, стоит упомянуть основные параметры метели, к которым относятся: скорость ветра, снегоперенос, интенсивность, насыщенность и продолжительность метели (Дюнин, 1963).

Все вышеописанные характеристики влияют на криосферу, гидросферу и техносферу. Влияние метелей на криосферу связано с лавинообразованием и сходом лавин (Казакова, Лобкина, 2016). Лавинопасные участки, такие как карнизы, образуются, отчасти, вследствие горизонтального снегопереноса, приводящему к перераспределению снежного покрова. Метель, как природное явление, влияет на гидросферу, способствуя образованию водоемов и горных рек. Перераспределенный снежный покров, вследствие метели, в весенний период при таянии питает горные реки и водоемы. Влияние на техносферу метелями способствуют образованию снежных заносов на железно-

рожном, автомобильных дорогах и взлетных полос аэропортов, затрудняет строительство нового дорожного полотна и сооружений, на территориях крайнего севера и Арктики, способствует неравномерному распределению (выдуванию) снежного покрова с сельскохозяйственных полей, вследствие чего приводит к неоднородному увлажнению почвы лавин (Казакова, Лобкина, 2017).

На сегодняшний день, для оценки влияния метелей используются автоматические приборы на основе различных физических принципов, например, SPC и FlowCapt FC4. На рисунке 1 представлены SPC и FlowCapt FC4 соответственно.

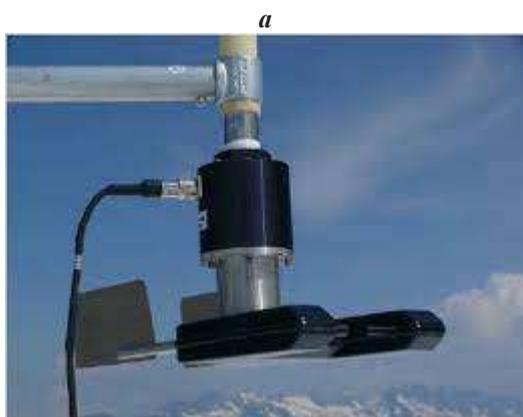


Рис. 1. Приборы для оценки влияния метелей: а – SPC; б – FlowCapt FC4.

Счетчик частиц снега SPC является оптическим устройством измерения параметров горизонтального снегопереноса, сопровождаемого ветром, и является одним из первых электронных устройств данного назначения. Прибор состоит из формирователя измерительной области, включающий в себя источник оптического излучения и фотоприемника, драйвер управления источником оптического излучения и преусилитель. В новой версии SPC используется фотоприемник с двойной щелью, что позволяет исключить внешний свет при измерении (Gubler, 1981; Kimura, 1991; Sugiura, Ohata, 1991; Sato, Kimura, Ishimaru, Maquyama, 1993).

К преимуществам прибора SPC можно отнести: автоматический режим работы и высокая чувствительность. Основным недостатком SPC является возможность измерять лишь часть параметров метелей.

Акустический измерительный прибор FlowCapt FC4 предназначен для непрерывной регистрации снегопереноса (Christin и др., 1999). Прибор состоит из сегментов закрытых труб длиной 1 метр, внутри которых размещены электроакустические преобразователи вместе с источником питания, фильтром и усилителем. Принцип обнаружения процесса снегопереноса основан на акустомеханическом соединении. Вследствие акустического давления, возникающее при трении потока частиц снега о корпус, возникает сигнал, который принимает преобразователь. Параметры сигнала за-

висят от скорости и массы транспортируемых частиц снега. Затем данные с преобразователя фильтруются, усредняются по времени в заданных частотных диапазонах, чтобы обеспечить пропорциональность потоку частиц  $Q$  ( $г/м^2с$ ) и сохраняются в регистраторе данных. Прибор можно использовать для получения информации о появлении, продолжительности и интенсивности горизонтального снегопереноса. Эта информация, относящаяся к процессу образования снежных заносов и имеет существенное значение для оперативного прогнозирования лавин (Jaedicke, 2001).

К преимуществам прибора FlowCapt FC4 можно отнести: автоматический режим работы; энергонезависимое питание; защитное покрытие; отсутствие движущихся частей; отсутствие необходимости обслуживания. Основным недостатком FlowCapt FC4, как и в случае SPC, является возможность измерять лишь часть параметров метелей.

По причине того, что приборы ограничены в измерении полного набора параметров метелей, необходима разработка абсолютно нового метелемера, который был бы лишен этого недостатка. В ИМКЭС СО РАН ведется разработка нового оптического измерителя параметров метели (ОИПМ), основанного на принципе измерения частиц оптическим методом.

Разрабатываемый прибор позволит в автоматическом режиме работы определять следующие параметры метелей:

- Вид метели (поземок, низовая, общая);
- Длительность;
- Интенсивность (объемное содержание частиц);
- Снегоперенос
- Продолжительность метели.

Приборное обеспечение для измерения параметров метелей не позволяет в полной мере обеспечить изучение влияния метелей на криосферу, гидросферу и техносферу. Данную проблему планируется решить созданием нового прибора на основе оптического метода регистрации частиц метелей.

### Литература

1. Атмосферные явления. Классификация и описание. // [meteocenter.net](http://meteocenter.net)
2. Дюнин А.К. Механика метелей. Новосибирск: Изд. СО АН СССР, 1963. 378 с.
3. Казакова Е.Н., Лобкина В.А. Снегоопасность о. Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2016. 112 с.
4. Казакова Е.Н., Лобкина В.А. Оценка снегоопасности территории острова Сахалин. Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 109–117. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-6(109-117)
5. Gubler H. An electronic remote snow drift gauge; J. Glaciol. 27, 1981, 164–174.
6. Kimura T. Measurements of drifting snow particles. Journal of Geography 100, 1991. 250–263.
7. Konosuke Sugiura, Tetsuo Ohata, Daqing Yang, Takeshi Sato, Atsushi Sato. Application of a snow particle counter to solid precipitation measurements under Arctic conditions. Cold Regions Science and Technology Volume 58, Issues 1–2, August 2009, pp. 77–83
8. Takeshi Sato, Tadashi Kimura, Taminoe Ishimaru, Toshisuke Maruyama. Field test of a new snow-particle counter (SPC) systell. Annals of Glaciology, 18, 1993.
9. Chritin V., Bolognesi R., Gubler H. FlowCapt: A new acoustic sensor to measure snowdrift and wind velocity for avalanche forecasting; Cold Reg. Sci. Technol. 30, 1999, 125–133.
10. Jaedicke C 2001 Acoustic snowdrift measurements: Experiences from the FlowCapt instrument; Cold Reg. Sci. Technol. 32 71–81.

УДК 551.583 / 551.581.2 / 551.585

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ КЛАСТЕРЫ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ НА ФОНЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА

Н.Н. Чередыко, Ю.В. Волков, В.А. Тартаковский, В.А. Крутиков

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН), Томск, Россия,  
atnik3@rambler.ru*

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской академии наук в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, проект № 121031300155-8.

По данным о приземной температуре оценивается изменение структуры климатической системы Северного полушария в разные интервалы лет, соответствующие известным климатическим периодам. Развивается метод климатической кластеризации на основе закономерностей синхронизации характеристик температурных колебаний на станциях.

*Ключевые слова: классификация, глобальные изменения климата, согласованность температурных колебаний, изменения структуры поля.*

We use data from measurements of surface temperature at stations in the Northern Hemisphere. The method of climatic clustering is being developed. These method is based on the regularities of temperature fluctuations at meteorological stations. The change in the climatic system structure in different intervals is estimated. These periods correspond to known climatic trends.

*Keywords: classification, global climate change, coherence of temperature fluctuations, changes in field structure.*

Классические климатические классификации индицируют различия региональных климатов, но не изменения климата, задача исследования которых остается актуальной уже несколько десятилетий. В проблеме изменения структуры климатической системы наиболее важными аспектами являются выбор информативных критериев и развитие объективных методов, оптимизирующих вычислительные затраты.

В докладе представлены результаты оценки особенностей структурирования температурного поля

Северного полушария в разные временные интервалы, соответствующие известным климатическим периодам со второй половины XX в. по настоящее время. Оценка проводится на основе только данных о приземной температуре, которую можно считать интегральным индикатором влияния всего комплекса климатоформирующих факторов и итогом реализации прямых и обратных связей внутри геосистемы. Динамика глобальной температуры является основным используемым показателем изменения глобального климата.

В основе развиваемого нами метода климатической кластеризации (Черedyкo и др., 2016) лежит принцип синхронности как совпадения существенных признаков временной динамики природно-климатических процессов. Естественно предполагать, что изменение состояния системы должно сопровождаться трансформацией ее структуры, что может отражаться в изменении режима синхронизации ее основных параметров. В данном случае станции группировались по степени согласованности изменения фазы температурных колебаний, критерием тесноты связи являлся коэффициент корреляции. Метод позволяет задавать любой его уровень, в зависимости от задач исследования и требуемой детализации процессов. Каждый климатический класс формируется вокруг типовой фазы, которая характеризует соответствующую климатическую закономерность. Получая структуру синхронизации температурных колебаний на станциях Северного полушария для разных интервалов лет, можно исследовать пространственную трансформацию структуры температурного поля на фоне изменения глобального климата и на этой основе климатической системы в целом.

Для расчетов использованы данные средней месячной температуры с 927 станций Северного полушария за период 1955–2016 гг. (Архив..., 2017). Задавался наиболее высокий пороговый уровень коэффициента корреляции (0,8), при этом в любом из рассмотренных

периодов получена четкая географическая локализация классов и их высокая отделимость.

Реализация метода для разных климатических периодов выявила изменения в степени согласованности колебаний температуры в разные интервалы лет. Также, выявлены территории, наиболее чувствительные к изменениям глобального климатического режима, где станции меняют свою структурную принадлежность в зависимости от глобальных тенденций. Главным образом, это районы наибольшего влияния основных центров действия атмосферы, горные регионы и высокоширотные области. Наиболее устойчивы структуры синхронизации температуры в Средней Сибири, Пиренейской области, на востоке Центральных равнин и Береговые низменности Северной Америки.

### Литература

1. Архив Университета Восточной Англии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.metoffice.gov.uk>, <http://www.cru.uea.ac.uk> (дата обращения 01.06.17).
2. Черedyкo Н.Н., Тартаковский В.А., Крутиков В.А., Волков Ю.В. Классификация климатов Северного полушария на основе оценки фазы температурного сигнала // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29. № 8. С. 625–632. doi:10.15372/AOO20160802.

УДК 551.584.61

## КОЛЕБАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Н.Н. Черedyкo<sup>1</sup>, М.А. Волкова<sup>2</sup>, О.Scholtz<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН), Томск, Россия, [atnik3@rambler.ru](mailto:atnik3@rambler.ru)

<sup>2</sup>НИ Томский государственный университет, Томск, Россия, [mv2101@mail.ru](mailto:mv2101@mail.ru)

<sup>3</sup>Deutscher Wetterdienst, Branch Office Essen. Essen, Germany, [olesya.scholz@dwd.de](mailto:olesya.scholz@dwd.de)

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научных проектов № 18-47-700005p\_a.

Оценивается изменчивость показателей отопительного периода в Томской области в период 1966–2018 гг. Ожидаемого значимого уменьшения продолжительности отопительных сезонов на фоне потепления глобального и регионального климата не выявлено, отмечается слабая отрицательная динамика сумм градусо-дней отопления. Динамика показателей отопительного периода имеет колебательный характер, наиболее значимы гармониками периодами порядка 3–5 и 8–9 лет.

*Ключевые слова:* изменение климата, отопительный период, сумма градусо-дней отопления, циклические изменения.

The variability of indicators of the heating period is estimated in the Tomsk region for the period 1966–2018. An expected significant decrease in the duration of heating seasons against the background of global and regional climate warming has not been revealed. There is a weak negative dynamics of the sums of heating degree-days. The fluctuations in the dynamics of indicators of the heating period are revealed. Harmonics with periods of the order of 3–5 and 8–9 years are most significant

*Keywords:* climate change, heating season, heating degree-days, cyclical changes.

Одной из наибольших нагрузок в системе регионального и государственного энергообеспечения являются затраты энергии на отопление помещений разного типа. Одним из основных факторов изменения затрат на отопления является климатический. Актуально и важно оценивание показателей отопительного сезона в связи с изменениями климата в межгодовом и междекадном масштабах, наиболее целесообразных при долгосрочном экономическом планировании. На фоне современного потепления в различных регионах, как правило, прогнозируется снижение затрат на отопление (Клименко и др., 2002; Второй Оценочный..., 2014; Spinoni et al., 2014; Larsen et al., 2020). В докладе приведены результаты такой оценки с использованием показателей отопительного сезона в Томской области за период 1966–2018 гг. по данным (Всероссийский..., 2020).

Анализ показал, что при наблюдаемых климатических изменениях для Томской области пока преждевременно говорить о существенном сокращении энергозатрат на отопление и необходимости существенной перестройки системы отопления. Рассмотренные основные показатели отопительных сезонов: градусо-дни отопления, продолжительности отопительных сезонов, средние суточные температуры, средние температуры самой холодной пятидневки, – в пределах их климатической изменчивости. Выявлена слабые отрицательные тренды градусо-дней отопления и продолжительности отопительного периода и слабые положительные для температурных показателей, но эти тренды незначимы на рассмотренных станциях. Все показатели изменяются циклически. Именно этот фактор целесообразно учитывать при долгосрочном планировании затрат на отопление. Наибольший вклад в амплитуду колебаний показателей отопительных сезонов в Томской области вносят гармоники с периодами порядка 3–5 и 8–9 лет. Также, вклад в изменчивость вносят квази 30-, 11-летние гармоники. Учет выявленной цикличности при долгосрочном планировании может существенно уточнять пределы потенциальных

затрат на отопление. Кроме того, важно учитывать, что в Томской области в аномальные зимы продолжительность переходных периодов к отопительному сезону и после него в большинстве случаев увеличивается. Также, для оптимизации затрат, необходимо учитывать вероятность периодов низких температур, их продолжительность и интенсивность. Так, например, сумма градусо-дней отопления в наиболее экстремальное за исследованный период событие «низкие температуры», продолжавшееся на станции Ванжиль-Кынак непрерывно 32 дня и 17 дней с небольшим перерывом на станции Томск, составила 24,5% от суммы градусо-дней за весь отопительный сезон 2005-2006 гг.

## Литература

1. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. Электронный ресурс. URL: <http://meteo.ru/date>. (дата обращения 15 мая 2020).
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014. М.: Росгидромет, 1008 с. Электронный ресурс. URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2full.pdf> (дата обращения: 12 декабря 2019).
3. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Микушина О.В. Изменение параметров отопительного периода на Европейской территории России в результате глобального потепления // Известия АН. Энергетика. 2002. № 2. С. 10–27.
4. Spinoni J., Vogt J., Barbosa P. European dedree-day climatologies and trend for the period 1951-2011 // International Journal of Climatology. 2014. V. 35. Iss. 1. pp. 25–36. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3959>.
5. Larsen M.A.D., Petrovic' S., Radoszynski A.M., McKenna R., Balyk O. Climate change impacts on trends and extremes in future heating and cooling demands over Europe // Energy & Buildings. 2020. V. 226. 110397. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110397>.

## АНАЛИЗ СОГЛАСОВАННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ШУМАМИ ЗЕМЛИ

Н.Н. Чередыко, С.Ю. Малышков, В.Ф. Гордеев, В.А. Тартаковский

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС СО РАН), Томск, Россия,  
atnik3@rambler.ru*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Томской области в рамках научного проекта № 18-47-700005p\_a.

Экспериментальный анализ согласованности атмосферных процессов с электромагнитными шумами Земли по данным измерений за 2020 год показал, что рассогласования временного хода значений интенсивности импульсного потока по разным каналам преимущественного приема наблюдались при меридиональных типах циркуляции по классификации Б.Л. Дзердзеевского, с существенным преобладанием меридиональной южной группы.

*Ключевые слова: атмосферная циркуляция, естественное импульсное электромагнитное поле Земли.*

The analysis of the coherence of atmospheric processes with the electromagnetic noise of the Earth was carried out. Measurement data for 2020 were used. The analysis showed that mismatches in the time variation of the values of the intensity of the impulse flow through different channels of predominant reception were observed with meridional types of circulation according to the classification of B.L. Dzerdzeevsky. The meridional southern circulation group prevailed significantly.

*Keywords: atmospheric circulation, earth's natural pulsed electromagnetic field.*

Основанием для принятия управленческих решений является объективная информация о развитии природно-климатических процессов в регионе. Такая информация может быть своевременной и адекватно сформирована на основе цифровых измерений в квазиреальном времени, получаемых с помощью современных аппаратно-программных средств мониторинга, объединенных в распределенный информационно-вычислительный комплекс. Такой комплекс непрерывных измерений температуры и влажности воздуха, а также литосферного потенциала развивается в целях мониторинга предвестников напряженного состояния региональных геосистем на примере Томской области. Микротермометрия осуществляется методом акустической локации. Для измерения литосферного потенциала в ИМКЭС СО РАН найдено аппаратно-методическое решение регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли (Gordeev et al., 2016).

Многолетние измерения в различных регионах с использованием этой аппаратуры показали, что естественное импульсное электромагнитное поле Земли (ЕИЭМПЗ) литосферного происхождения имеет ярко выраженный устойчивый суточный и сезонный ход (Малышков и Малышков, 2009). Сравнительные измерения ЕИЭМПЗ на разных полигонах Томской области, разнесенных на 100 км, по двум каналам преимущественного приема (Север – Юг и Запад-Восток) проводимые для отслеживания региональных особенностей отклика на внешние воздействия, показали, что большую часть периода измерений временной ход ЕИЭМПЗ по обоим каналам для этих двух пунктов согласован. На некоторых участках временного хода происходит рассогласование регистрируемых с разных направлений

сигналов. Можно предположить, что, несмотря на то, что антенны принимают сигнал с разных направлений, электромагнитное поле, в целом, модулируется едиными крупномасштабными процессами, связанными с вращением Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца, а периоды рассогласования могут быть связаны с динамическими процессами в литосфере (Gordeev et al., 2016), локальными процессами в точке измерения или с изменением условий распространения электромагнитных волн в волноводе земля-ионосфера.

Такие интервалы рассогласований представляют интерес и были исследованы в связи с погодными ситуациями в эти периоды. Для анализа использовали данные измерений ЕИЭМПЗ за 2020 г. с двух измерительных пунктов, Киреевск и Полюнянка, разнесенных на 100 км. Выявлено, что на обоих пунктах наиболее выраженные рассогласования временного хода ЕИЭМПЗ разных направлений наблюдались при меридиональных типах циркуляции по классификации Б.Л. Дзердзеевского (Кононова, 2009), с существенным преобладанием меридиональной южной группы. При элементарных циркуляционных механизмах (ЭЦМ) таких типов циркуляции в Северном полушарии наблюдаются интенсивные меридиональные атмосферные процессы, отмечаются высокие барические градиенты. В более 60% случаев снижение согласованности наблюдаются при меридиональном южном типе циркуляции (ЭЦМ 13з и 13л), который характеризуется тем, что над полюсом развивается циклоническая деятельность (Кононова, 2009), в отличие от всех остальных 12ти типов, когда над полюсом область высокого давления. В среднем в 25% случаев снижение согласования наблюдалось при меридиональной северной группе циркуляции. С теми

же типами циркуляции, примерно в таком же соотношении, связаны периоды, когда в летний сезон года несколько дней подряд отмечаются низкие значения интенсивности импульсного потока по разным каналам преимущественного приема.

Во многих исследованиях показано, что ЭЦМ меридиональных типов циркуляции вносят наибольший вклад в формирование экстремальных природных событий в различных регионах (Кононова, 2009; Волкова и др., 2019). Формируются метеорологические экстремумы, следствием которых могут быть природные и технологические катастрофы разного рода. Экспериментальный анализ согласованности атмосферных процессов с электромагнитными шумами Земли по данным за 2020 год показал, что, вероятно, причины существенных аномалий в динамике метеорологических и литосферных событий одни и те же. Исследование их природы и механизмов реализации в региональной геосистеме представляет и научный, и практический интерес.

УДК 551.501: 551.515.4

## **ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГРОЗ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**В.В. Чурсин\*, И.В. Кужевская**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия,  
\*skriptym@mail.ru*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90059.

В работе рассмотрена возможность использования данных микроволновой интегрированной восстанавливающей системы (MiRS) расширенных дополнительными расчетными параметрами атмосферы и алгоритма машинного обучения (XGBoost) для детектирования грозových ячеек. Получено, что при значении в модели вероятности развития гроз более 80 %, достоверность модельного и фактического наличия грозы совпадают.

*Ключевые слова: Западная Сибирь, машинное обучение, дистанционное зондирование.*

The research investigates the possibility of detecting lightning cells using data from the microwave integrated recovery system (MiRS) supplemented by extra calculated atmospheric parameters and a machine learning algorithm (XGBoost). When the model probability of thunderstorm development is greater than 80 %, the model and actual thunderstorm presence reliability are shown to be identical.

*Keywords: Western Siberia, machine learning, remote sensing.*

### **Введение**

Существующие методы выделения зон развития атмосферных явлений основаны как на данных непосредственных измерений, например, с помощью доплеровских метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ), так и на данных численного прогнозирования, дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и совместного их использования (Вельтищев, 2010; Романский, 2014; Avotniece, 2017).

Создаваемые специализированные продукты, должны обладать высокой достоверностью, оперативно-

### **Литература**

1. Волкова М.А., Чередыко Н.Н., Титовская А.А., Журавлев Г.Г. Изменения параметров экстремальности температурного режима на юге Западной Сибири в холодный период // Труды ГГО. 2019. Вып. 594. С. 120–136.
2. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / отв. ред. А.Б. Шмакин. М.: Воентехиздат, 2009. 372 с.
3. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра земли // Геология и геофизика. 2009. Т 50. № 2. С. 152–172.
4. Gordeev V.F, Malyshev S.Yu, Shtalin S.G, Polivach V.I and Krutikov V.A. Detection of geodynamic activity areas based on the Earth's electromagnetic noise parameters // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 48. 012026. doi:10.1088/1755-1315/48/1/012026.

стью и полным охватом контролируемой территории. Поэтому использование различных информационных продуктов позволяет проводить более точный анализ синоптической ситуации. Так, наибольшую достоверность определения атмосферных явлений дают данные ДМРЛ, однако их зона охвата около 250 – 300 километров, а их количество на территории России мало. В методах, основанных на параметрах атмосферы, полученных численным моделированием трудно добиться одновременно высокой точности и оперативности расчетов. Тем не менее, анализ высотного распределения

метеопараметров остается главным синоптическим методом выявления зон развития атмосферных явлений.

Температурно-влажностное зондирование атмосферы, или восстановление профилей метеовеличин, с помощью микроволновых измерений метеорологических спутников активно используется с 60-70-х годов (Асмус, 2008). Микроволновые измерения не зависят от наличия облачности и типа подстилающей поверхности и позволяют восстанавливать метеопараметры в зонах отсутствия ДМРЛ и аэрологических станций. Последующая обработка полученных вертикальных профилей с помощью специализированных алгоритмов позволяет получать спутниковые информационные продукты (Пьянков, 2014). Создание специализированных продуктов, обладающих высокой информативностью и достоверностью, является актуальной задачей, поскольку их использование в оперативно прогностической работе метеослужб позволяет проводить более точный анализ синоптической ситуации.

### **Обучение алгоритмов машинного обучения**

Обучение нейронной сети – это процесс, при котором происходит настройка параметров нейронной сети посредством моделирования среды, в которую эта сеть встроена. В процессе обучения нейронная сеть выявляет сложные зависимости между входными и выходными данными и выполняет обобщение. В работе использовалась открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная компанией Google-TensorFlow (Орельен 2018), дополненная нейросетевой библиотекой KERAS (Джулли 2017), а также одной из самых эффективных реализаций алгоритма градиентного бустинга на деревьях решений – XGBoost.

Для обучения нейронной сети детектирования гроз применялся метод обучения с учителем. Процесс обучения с учителем представляет собой предъявление нейронной сети выборки эталонных обучающих примеров.

За эталонные данные были приняты:

1. Данные наземной наблюдательной сети. Для обучения использовалась информация об атмосферных явлениях, зафиксированных на 135 метеорологических станциях Сибири, времени начала и окончания явления;
2. Данные реанализа ERA5. ERA5 производится ECMWF и предоставляют почасовые данные о параметрах поверхности суши, моря и атмосферы (для 37 уровней давления, от подстилающей поверхности до 80 км) с 1979 года по настоящее время. Пространственное разрешение –  $0.1 \times 0.1^\circ$ . ERA5 является результатом ассимиляции данных 4D-Var в CY41R2 интегрированной прогностической системе ECMWF (IFS), которая усваивает данные наземной наблюдательной сети и данные аэрологического зондирования (Hersbach, 2020). Для обучения использовались данные о вертикальном распределении температуры и влажности. На их основе рассчитывались вертикальные профили температуры точки росы, относительной влаж-

ности, дефицита точки росы и значения индексов неустойчивости (Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals, K-индекс и высоты нижней границы конвективной облачности).

Данные наземных наблюдений и реанализа были совмещены в пространстве и времени. Для этого, использовалась разница во времени наблюдений не более 5 минут, а профили метеопараметров строились по ближайшему к метеорологической станции узлу сетки.

Полная выборка данных включала в себя 1 325 245 случаев за май – октябрь 1990 – 2018 гг. и содержала в себе данные о метеорологических явлениях и сопутствующих им значениях характеристик.

Весь массив данных был случайным образом разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 70 % (927 672 случая) на 30 % (397 573 случая), с сохранением количественного распределения явлений. На выборке, состоящей из 927 672 случаев, проводилось обучение, а на выборке, состоящей из 397 573 случаев – проверка.

После обучения, достоверность всех полученных моделей оценивалась на тестовой выборке – результаты расчетов сравнивались с эталонными данными. Получены следующие значения достоверностей (значение достоверности для обучающей выборки / значение достоверности для тестовой выборки):

- Модели бинарной классификации – 72,1 % / 72,3 %;
- Модель классификации осадков на 3 группы – 75,0 % / 74,0 %;
- Итоговая мультиклассификационная многослойная нейронная сеть присвоения атмосферного явления – 82,1 % / 81,8 %.

### **Оценка достоверности детектирования вероятных зон гроз по данным штормовых телеграмм в коде WAREP**

В оценке достоверности участвовало 109 метеорологических станций территории управления Западно-Сибирского УГМС, расположенных в пределах  $49,9-60,35^\circ$  с.ш. и  $75,68-88,67^\circ$  в.д., за май-сентябрь 2019 и 2020 года. Отдельные параметры конвективной облачности, продуцирующей опасные конвективные явления на территории Западной Сибири, представлены в (Kuzhevskaja et al., 2019).

Для оценки достоверности детектирования вероятных зон гроз использовалась выборка данных метеостанций, содержащая в себе:

- индекс станции;
- широту и долготу станции;
- дату;
- время начала и окончания грозы.

Данные наземных наблюдений и восстановленные по спутниковым измерениям параметры атмосферы были совмещены в пространстве (расстояние от станции не более 10 км) и времени (разница во времени наблюдений не более 10 минут).

Для корректной оценки количества ложного детектирования гроз, массив был дополнен случаями отсут-

ствии грозových явлений в момент пролета космического аппарата (КА). Условием отбора случаев без грозы были значения параметров атмосферы, близкие к параметрам атмосферы при грозах. Близость определялась как среднее значение параметра атмосферы при грозах, плюс-минус стандартное отклонение. Использование массива с однородно распределенными параметрами атмосферы при наличии и отсутствии грозového явления делает невозможным классификацию по пороговым значениям. Т.е. полученная выборка исключает случайный прогноз грозového явления по достижению параметром атмосферы значения, при котором гроза статистически возможна. Использование заведомо сложной для классификации выборки позволяет оценить, насколько эффективно разработанная нейронная сеть улавливает закономерности в структурах параметров.

Итоговый массив содержал 3330 случаев, из которых 1591 случай наличия грозového явления на станции в момент пролета КА и 1738 случай с отсутствием грозového явления. В процентном соотношении число случаев с грозами и без гроз составляло 47,8 на 52,2 %. Достоверность, превышающая значение 52,2 % может считаться положительным результатом, поскольку превышает вероятность случайного прогноза.

Оценочные характеристики таблицы сопряженности бинарных прогнозов рассчитывались в соответствии с «Методическими указаниями по проведению испытаний...» (РД 52.27.284-91). Оценка достоверности производилась для значений вероятности от 5 до 100 % с шагом в 5 %. В таблице 1 представлены результирующие оценки по станциям, входящим в зону ответственности Западно-Сибирского УГМС.

Максимальное значение общей оправдываемости (ОО = 69 %) и максимальное значение Критерия Пирси-Обухова (Т=0,4) отмечается при 75 % вероятности наличия гроз. Положительные значения Т свидетельствуют о том, что предупредительность явления превышает отношение ошибочных прогнозов явления к фактическому числу дней без явления. При значении вероятности развития гроз 80 %, достоверность фактического наличия грозы (О+) составляет 78 %, и возрастает с увеличением вероятности.

Таким образом, оценка достоверности детектирования вероятных зон гроз для территории управления Западно-Сибирского УГМС, с использованием данных штормовых телеграмм в коде WAREP показала следующее:

Таблица 1. Результирующие оценки детектирования зон гроз по станциям, входящим в зону ответственности Западно-Сибирского УГМС

Вероятность развития грозového явления, %	Матрица сопряженности, количество случаев					Расчетные оценки, %							Т	Уя+Пя
	n11	n12	n21	n22	n00	О+	О-	ОО	Р+	Р-	ФФ+	ПП+		
5	1565	1738	27	0	3330	47	0	47	98	0	48	99	0	146
10	1541	1738	51	0	3330	47	0	46	97	0	48	98	0	144
15	1521	1738	71	0	3330	47	0	46	96	0	48	98	0	142
20	1512	1736	80	2	3330	47	2	45	95	0	48	98	0	142
25	1498	1734	94	4	3330	46	4	45	94	0	48	97	-0,1	140
30	1478	1726	114	12	3330	46	10	45	93	1	48	96	-0,1	139
35	1456	1699	136	39	3330	46	22	45	91	2	48	95	-0,1	138
40	1416	1580	176	158	3330	47	47	47	89	9	48	90	0	136
45	1366	1408	226	330	3330	49	59	51	86	19	48	83	0	135
50	1295	1188	297	550	3330	52	65	55	81	32	48	75	0,1	133
55	1195	969	397	769	3330	55	66	59	75	44	48	65	0,2	130
60	1108	788	484	950	3330	58	66	62	70	55	48	57	0,2	128
65	1007	632	585	1106	3330	61	65	63	63	64	48	49	0,3	125
70	926	443	666	1295	3330	68	66	67	58	75	48	41	0,3	126
75	844	300	748	1438	3330	74	66	69	53	83	48	34	0,4	127
80	733	207	859	1531	3330	78	64	68	46	88	48	28	0,3	124
85	614	107	978	1631	3330	85	63	67	39	94	48	22	0,3	124
90	456	40	1136	1698	3330	92	60	65	29	98	48	15	0,3	121
95	283	0	1309	1738	3330	100	57	61	18	100	48	8	0,2	118
100	0	0	1592	1738	3330	-	52	52	0	100	48	0	0	-

1. Успешно выделяются зоны возможных грозовых явлений по распределению метеопараметров в вертикальном профиле, в том числе и в условиях, когда это невозможно определить пороговыми методами.

2. При значении в модели вероятности развития гроз 80 %, достоверность фактического наличия грозы (О+) составляет 78 %. С увеличением значений вероятности развития гроз достоверность фактического наличия гроз увеличивается. Ложноположительное детектирование гроз при значениях вероятности > 80 % происходит редко, поэтому в оперативной работе синоптика, в первую очередь, стоит обращать внимание на участки с этими значениями вероятности.

3. Для уменьшения количества ложного детектирования рекомендуется использовать результаты детектирования гроз при помощи алгоритмов машинного обучения совместно с картами параметров облачного покрова (типы облачности, высота и температура ВГО), что позволяет исключать зоны с отсутствующей облачностью.

### Литература

1. Асмус В.В., Милехин О.Е., Успенский А.Б. Спутниковые наблюдения Земли и дистанционные измерения, усваиваемые в моделях прогноза погоды // ГУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» (Москва). 2008.
2. Вельтищев Н., Жупанов В. Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM // в кн. 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада ЛТД, 2010. С. 95–142.
3. Джулли А., Пал С. Библиотека Keras - инструмент

глубокого обучения. Реализация нейронных сетей с помощью библиотек Theano и TensorFlow // ДМК-Пресс, 2017. 294 с.

4. Орельен Жерон. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow. Концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем // Вильямс, 2018. 688 с.
5. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. // Пермский государственный национальный исследовательский университет (Пермь). 2014.
6. РД 52.27.284-91. Руководящий документ. Методические указания по проведению производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. М.: Гидрометцентр, 1991. 150 с.
7. Романский С.О., Вербицкая Е.М. Краткосрочный численный прогноз погоды высокого пространственного разрешения по Владивостоку на базе модели WRF-ARW // Вестник ДВО РАН, 2014. № 5. С. 48–57.
8. Avotniece Z. et al. Remote Sensing Observations of Thunderstorm Features in Latvia // Environmental and Climate Technologies, 2017. Т. 21. №. 1. С. 28–46.
9. Hersbach H. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach et. al. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020. DOI:10.1002/qj.3803.
10. Kuzhevskaja I., Volkova M., Nechepurenko O. and Chursin V. A study of hailstorms in the South of Western Siberia // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698, 2019. 044036. pp. 1-7. DOI:10.1088/1757-899X/698/4/044036

УДК 555.1:502.2.05

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ПРОФИЛЕМЕРА

В.А. Шкляев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет (ПГНИУ), Пермь, Россия, shkلياevvl@yandex.ru

<sup>2</sup>Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем (УралНИИ-«Экология»), Пермь, Россия

Анализируются результаты наблюдений за термической стратификацией в нижнем 1000-метровом слое атмосферы. Установлена статистическая связь характеристик инверсий во времени. Зимой наиболее вероятны приподнятые инверсии, а летом – приземные. Выполнена оценка количественной связи уровня загрязнения атмосферы с различными характеристиками инверсий. Исследовалась частота городского «острова тепла» зимой. Анализ суточных амплитуд на различных высотах позволил оценить интенсивность турбулентного обмена.

*Ключевые слова:* профили температуры, характеристики инверсий, городской «остров тепла», интенсивность турбулентного обмена.

The results of observations of thermal stratification in the lower 1000-meter layer of the atmosphere are analyzed. A statistical relationship between the characteristics of inversions in time has been established. In winter, raised inversions are most likely, and in summer, surface inversions. An assessment of the quantitative relationship of the level of atmospheric pollution with various characteristics of inversions was carried out. The frequency of urban “heat island” in winter was investigated. The analysis of diurnal amplitudes at various altitudes allowed us to estimate the intensity of turbulent transfer.

*Keywords:* temperature profiles, characteristics of inversions, urban “heat island”, intensity of turbulent transfer

Метеорологический температурный профилемер МТР-5, позволяет исследовать вертикальные температурные профили с временной дискретностью в 5 минут и пространственным разрешением в 50 м, а также дает возможность определения условий формирования инверсий, типа инверсий, их продолжительности, мощности и глубины. Анализ полученных данных наблюдений за 5-летний период хорошо иллюстрирует возможности изучения нижней атмосферы.

### 1. Типизация профилей температуры воздуха.

Вертикальные профили температуры дают наглядное представление о термической стратификации нижнего 1000 метрового слоя атмосферы и ее динамике в течение суток. Для этой цели вертикальные профили группировались по срокам 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21ч ВСВ в центральные месяцы сезона.

Январь характеризуется месяцем с преобладанием приподнятых инверсий. Образованию продолжительных приземных инверсий в этот период года препятствует городской «остров тепла», а условия для формирования изотермии или инверсии на относительно больших высотах могут существовать в течение все-

го дня. Приподнятые инверсии формировались выше 200 м, а далее температура с высотой росла до высоты 900 м в течение всего дня. В этом случае различные характеристики инверсий мало изменялись в течение всего дня. Подтверждением этого может служить график автокорреляционной функции глубины инверсии, иллюстрирующий достаточно хорошую связь этой характеристики даже при величине сдвига около суток (рис. 1).

Формирование приподнятых инверсий температуры зимой способствует образованию высокого уровня загрязнения за счет высоких источников и штилевого слоя ниже высоты источника выбросов загрязняющих веществ.

Апрель является переходным месяцем года. В первой половине месяца отмечается устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 0 °С к ее положительным значениям. Месяц является благоприятным для образования приземных инверсий. Развитие данного типа инверсии определяется затратой большого количества тепла, отдаваемого воздухом при таянии снега.



Рис. 1. Временная автокорреляционная функция глубины инверсий в слоях 0–300 и 0–500м

При больших скоростях ветра приземная инверсия может перейти в приподнятую. Приземные инверсии наблюдаются в утренние часы с 0 до 6 часов, а их мощность составляет примерно 100–200 метров.

Июль характеризуется как самый теплый месяц года. В этот месяц наблюдались приземные не глубокие приземные инверсии в ночные и утренние сроки, а днем при интенсивном прогреве они разрушались.

В октябре наблюдается наименьшее число дней с температурными инверсиями, а средний профиль температуры за это месяц характеризуется падением температуры с высотой.

**2. Характеристика инверсий.** Совместный анализ частоты инверсий, определяемых по данным радиозондирования и профилемера, выполненный ранее показал, что есть некоторое различие в частоте как

приземных, так и приподнятых инверсий (Шкляев, Шкляева, 2014). Было установлено, что в январе и декабре приземные инверсии чаще отмечаются при радиозондировании, что может быть объяснено отепляющим влиянием города на нижний слой атмосферы в этот период года, так как пункт радиозондирования расположен на некотором удалении от городской застройки (табл. 1). В тоже время, в январе – феврале приподнятые инверсии, с нижней границей менее 300 м по данным профилемера встречаются наиболее часто. Они имеют значительную глубину и мощность. Приподнятые инверсии, определяемые по профилемеру, встречаются намного чаще, чем по данным радиозондирования. Это может быть объяснено непрерывными наблюдениями при его использовании в отличие от двухразовых выпусков радиозонда.

Таблица 1. Сравнение частоты инверсий различных типов, определяемых по данным радиозондирования и профилемера, %

Типы инверсий	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Приземные инверсии, МТП-5	39	43	62	67	81	84	83	76	67	20	20	18
Приземные инверсии, р/з	42	26	33	22	36	41	36	36	31	9	13	23
Приподнятые инверсии, МТП-5	85	80	70	61	52	78	79	71	66	45	67	75
Приподнятые инверсии, р/з	10	0	8	0	0	1	3	0	0	1	3	2

Исследование продолжительности инверсий проводилось по результатам наблюдений МТП-5. Рассматривались приземные инверсии, начинающиеся от поверхности земли, приподнятые, нижняя граница которых начинается от 50 до 300 м и те, которые формируются выше 300 м до 1000 м. Использование профилемера позволяет детально исследовать термическую стратификацию нижнего слоя атмосферы и оценить условия рассеивания вредных веществ.

Исследование годового хода частоты инверсий показало, что наибольшее количество дней с приземными инверсиями наблюдается летом, а с приподнятыми – в январе. Наименьшее количество дней с инверсиями всех типов наблюдается осенью в октябре-ноябре.

Средняя суточная продолжительность инверсий максимальна в период с ноября по март, в первую очередь за счет приподнятых инверсий. В теплую половину года преобладают приземные инверсии, хотя общая продолжительность таких инверсий минимальна.

Приземные инверсии достигают максимальной мощности в декабре-феврале. В теплую часть года мощность уменьшается до величины 180–200 м. Минимальная мощность приземных инверсий наблюдается в октябре, достигая 130 м. Глубина приземных инверсий коррелирует с их мощностью, коэффициенты корреляции для этих характеристик в различные сезоны изменяются от 0,85 зимой до 0,64 летом.

**3. Загрязнение атмосферы.** Известно, что высокий уровень загрязнения воздуха в значительной степени определяется метеорологическими условиями. Наличие приподнятых и приземных инверсий, как правило, способствует ослаблению турбулентного обмена у земли и может приводить к увеличению загрязнения атмосферы. В этом случае должна проследиваться связь характеристик инверсий с параметром Р, который рассчитывается по результатам ежедневных наблюдений за загрязнением атмосферы. В Перми этот интегральный показатель рассчитывается по наблюдениям на 7 стационарных постах и используется для

прогноза экстремально высокого уровня загрязнения воздуха (ЭВУЗВ) совместно с синоптическим прогнозом и анализом метеорологических условий.

Уровень загрязнения атмосферы, кроме характеристик источников выбросов, зависит от синоптических условий, типа инверсий, мощности, глубины и их продолжительности. Для выявления роли этих факторов, влияющих на уровень загрязнения атмосферного воздуха, использовались ежедневные значения параметра Р в г. Перми и результаты наблюдений за вертикальными профилями температуры воздуха в нижнем 1000-метровом слое. Количественная связь этого параметра за весь период наблюдений с такими характеристиками инверсий, как продолжительность и глубина была значима, хотя коэффициент корреляции не превосходил 0,5.

Выявлена связь параметра Р с продолжительностью приземных инверсий в зимний и весенний сезоны с коэффициентом корреляции более 0,60.

Менее значимы зависимости параметра Р с мощностью и продолжительностью приземных инверсий осенью, а летом они наименее выражены, но значимы.

Глубина приподнятых инверсий хорошо коррелирует с параметром Р весной, а осенью такая связь отсутствует. Летом и зимой коэффициенты корреляции между этими характеристиками значимы, но не велики.

**4. Выявление городского «острова тепла».** Влияние городского «острова тепла» приводит к увеличению частоты приподнятых инверсий по сравнению с приземными в холодную часть года. Исследовалось наличие «острова тепла» с помощью графиков изменения температуры с высотой по данным радиозондирования и профилемера МТП – 5.

Приземная инверсия выбиралась без ограничений, а приподнятая с нижней границей не выше 500 м над уровнем моря. Анализ этих данных показал, что в г. Перми в зимние месяцы более чем в 60 % случаев формируется «остров тепла» (табл. 2).

Таблица 2. Результаты исследований острова тепла

Месяц	Количество дней	Количество дней с «островом тепла»	Повторяемость «острова тепла» за все сроки, %	Повторяемость «острова тепла» в дни с инверсией, %
Декабрь	81	68	76	72
Январь	90	67	60	56
Февраль	53	47	86	83

Максимальная повторяемость «острова тепла» наблюдалась в феврале и составила 86 % от всех наблюдений. Минимальная повторяемость – 60 %, наблюдалась в январе. В дни с инверсией, повторяемость острова тепла увеличивалась. Минимальная повторяемость составила 56 % и отмечалась в январе, максимальная составила 83 % в феврале.

Далее, рассматривалось наличие «острова тепла» в дни, когда наблюдалась приземная и приподнятая инверсия, а также случаи, когда одним методом обнаруживалась приземная инверсия, а другим – приподнятая. Проанализировав эти результаты, было выявлено, что в большинстве случаев «остров тепла» наблюдался в сроки с приземной инверсией.

**5. Исследование суточных амплитуд колебаний и определение коэффициента турбулентности.** Суточные амплитуды температуры в течение года испытывают существенные изменения. Это объясняется значительными годовыми колебаниями радиационного баланса, облачности, состояния деятельной

поверхности. В летнее время при сильно развитой турбулентности тепло от поверхности земли быстро распространяется по вертикали, благодаря чему температура на высоте также испытывает колебания. При незначительной величине радиационного баланса и слабом турбулентном обмене амплитуда колебаний температуры поверхности сравнительно невелика. В этом случае толщина слоя, в котором имеют место суточные колебания, оказывается небольшой.

Максимальные значения суточных амплитуд температуры наблюдаются летом (наибольшее значение в мае-июне), в этот период наибольший световой день, преобладают безоблачные дни и воздух сильно прогревается днем, а ночью выхолаживается (табл. 3). Минимальные амплитуды температуры представлены в начале и первой половине зимы (наименьшее значение – в ноябре), когда погода чаще всего бывает пасмурной, днем воздух прогревается незначительно, а ночью облачность предохраняет его от сильного выхолаживания.

Таблица 3. Амплитуды колебаний температуры воздуха на различных высотах в слое от 0 до 500 м, °С

Месяц	Уровни, м						
	0	50	100	200	300	400	500
Январь	2,4	2,2	2,0	1,6	1,3	1,1	1,1
Апрель	7,3	6,6	6,0	5,0	4,1	3,4	3,0
Июль	7,6	7,0	6,1	4,9	4,0	3,3	2,9
Октябрь	2,0	1,8	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0

Период с августа по октябрь сопровождается существенным снижением суточной амплитуды температуры, прежде всего за счет уменьшения приходящего потока коротковолновой радиации и более высоких минимальных температур при отсутствии снежного покрова по сравнению с мартом.

Существенным фактором, приводящим к уменьшению амплитуды колебаний температуры с высотой, является интенсивность турбулентного обмена в пограничном слое атмосферы. В этом случае связь амплитуд на разных уровнях выражается следующим образом

$$A(z) = A(0) \cdot e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2k}}z},$$

где  $A(z)$ ,  $A(0)$  – амплитуды колебаний температуры на высоте  $z$  и на поверхности земли,  $\omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $k$  – коэффициент турбулентности, средний в рассматриваемом слое.

Зная величину амплитуды на различных уровнях можно оценить среднее значение коэффициента турбулентности.

Другой вариант оценки среднего коэффициента турбулентности заключается в использовании времени сдвига в наступлении максимума или минимума в суточном ходе температуры на различных уровнях.

Например, используя данные профилемера за июль, были получены следующие значения коэффициента турбулентности: в ночное время в слое 500 м среднее значение составило 17,5 м/с, а днем – 344,2 м/с.

Таким образом, наблюдения по профилемеру МТП-5 являются эффективным инструментом исследования нижней атмосферы.

### Литература

1. Шкляев В.А., Шкляева Л.С. Исследование инверсий нижней атмосферы по результатам наблюдений температурного профилемера и радиозондирования// Географический вестник. Перм. ун-т. 2014. № 4 (31). С. 62–66.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БАЗЫ ДАННЫХ ПО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ПОЧВ И ГРУНТОВ GSDE (GLOBAL SOIL DATASET FOR EARTH SYSTEM MODELS) С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Е.С. Шуклина<sup>1,2</sup>, Н.Н. Воропай<sup>2,3</sup>, А.А. Черкашина<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, ekaterinakot99@gmail.com

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия, voropay\_nn@mail.ru

<sup>3</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия, anna\_cher.87@mail.ru

Моделирование процессов на поверхности суши требует полной и достоверной информации о механических свойствах почвы, гидравлических, тепловых параметрах. Материалы такого рода долгое время издавались в виде справочников, а в последнее время хранятся, распространяются и используются в виде баз данных. Точность и достоверность результатов моделирования сильно зависят от полноты и качества этой информации.

*Ключевые слова:* почва, база данных, моделирование, деятельный слой суши, натурные наблюдения

Modeling of processes on the land surface requires complete and reliable information about the mechanical properties of the soil, hydraulic, thermal parameters. Materials of this kind have been published for a long time in the form of reference books, and recently they are stored, distributed and used in the form of databases. The accuracy and reliability of the simulation results strongly depend on the completeness and quality of this information.

*Keywords:* soil, database, modeling, active land layer, field observations

Обеспечение любой модели качественной исходной информацией является основой адекватного прогноза, следовательно сравнение базы данных по гранулометрическому составу почв и грунтов GSDE (Global Soil Dataset for Earth System Models) с данными натурных наблюдений и дальнейшая верификация расчетов поможет улучшить качество результатов моделирования.

Одним из основных требований для моделирования процессов к исходным данным является их сеточное распределение по территории. Отсюда следует, что рассматриваемая база данных GSDE, предоставляющая собой глобальный набор данных о почвенных характеристиках с координатной привязкой может быть использована при моделировании природных процессов. Ее пространственное горизонтальное разрешение данных 30×30», вертикальное состоит из восьми слоев до глубины 2,3 м. База создавалась путем согласования и стандартизации региональных почвенных баз данных и почвенной карты мира с 31 339 почвенными профилями (Shangguan et al., 2014). Она содержит информацию об основных свойствах почвы, т.е. объемные доли песка, пыли, глины, гравия, органики, воды и минералов в почвах, а также тепло- и гидрофизические характеристики.

На территории Тункинской котловины были получены данные о гранулометрическом составе почв и пород с 9 площадок (A26, A27, A28, A29, A32, A35, A37, A38, A83), отличающихся почвенно-ландшафтным разнообразием (табл. 1). Отбор образцов почв и грунтов осуществлялся до глубины 3,2 м. Определение гранулометрического состава проводили пипеточным методом в стоячей воде, предложенным Н.А. Качинским (Качинский, 1958).

С помощью языка программирования MATLAB произведена обработка и интерпретация большого массива данных базы GSDE (создан и прописан код).

В данной среде построены карты пространственного распределения почвенных характеристик. Для каждой площадки исследования был сформирован пакет исходных данных по грансоставу почвы в 4 узлах координатной сетки по 8 слоям по глубине. Площадки, на которых производились натурные наблюдения, находятся в конкретной точке в пределах четырехугольника с углами в указанных узлах сетки.

При сравнении параметров базы данных грансостава, свойств почв и грунтов GSDE с полевыми данными было обнаружено, что при подборе параметров, используемых в математических моделях, главным недостатком традиционных методов исследования почвенного покрова является низкое пространственное разрешение получаемых данных при обследовании обширных по площади территорий в связи с их высокой трудоемкостью и часто трудной доступностью объектов исследования. Поэтому для полного обеспечения модели данными необходимо использование глобальных баз данных либо слияние нескольких.

Еще одним отличием является разность классификаций гранулометрического состава. В почвах и породах могут находиться частицы диаметром как менее 0,001 мм, так и более нескольких сантиметров. Для подробного анализа весь возможный диапазон размеров делят на участки, называемые фракциями. Единой классификации частиц не существует (Белов, Аристова, 2016).

Данные натурных наблюдений были разделены по Всероссийской классификации, разработанной Н.А. Качинским (рис. 1) на основании содержания физической глины с учётом доминирующей фракции и типа почвообразования: <0,001 мм ил; 0,001–0,005 пыль мелкая; 0,005–0,01 пыль средняя; 0,01–0,05 пыль крупная; 0,05–0,25 песок мелкий; 0,25–0,5 песок средний; 0,5–1,0 песок крупный; >1 мм гравий.

В глобальной базе данных используется классификация относительного содержания фракций песка, пыли и глины по Аттербергу (рис. 2). Она является международной классификацией, классификацией общества почвоведов (SSSA) и общества агрономов

(ASSA) США. Для определения названия почвы используют треугольник Ферре. Выделяются следующие фракции: <0,002 мм глина; 0,002–0,05 пыль; 0,05–0,2 тонкий песок; 0,2–2 грубый песок; >2 мм гравий.

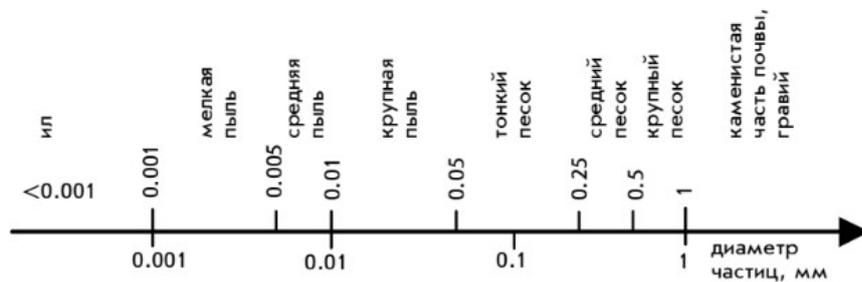


Рис. 1. Фракции гранулометрических элементов (по Н.А. Качинскому)



Рис. 2. Фракции гранулометрических частиц (по А. Аттербергу)

В данном исследовании для адекватного сравнения почвенных характеристик был совершен перевод из одной классификации в другую с высоким уровнем точности (табл. 2).

Стоит отметить, что GSDE использует 8 слоев почв и имеет фиксированную градацию глубин: 0–0,045; 0,045–0,091; 0,091–0,166; 0,166–0,289; 0,289–0,493; 0,493–0,829; 0,829–1,383 и 1,383–2,296 м. Тогда как в натуральных наблюдениях глубина отбора проб на каждой площадке разная, что обусловлено неоднородностью гранулометрического состава на различных глубинах в каждом отдельно взятом разрезе. Для дальнейшей работы данные натуральных наблюдений были проинтерполированы на фиксированную градацию глубин.

Также, при сравнении данных гранулометрического состава почвы, взятых из баз GSDE и натуральных наблюдений, было отмечено, что разность между процентным содержанием фракции пыли в почве минимальна на площадке А83 и составляет не более 6 %. Разность между данными о содержании глины не превышает 5 % на площадке А32. Песок – до глубины 28,9 см наблюдается с минимальной разностью в 3 % на площадке А28. По гранулометрическому составу наиболее схожи данные натуральных наблюдений, взятых на площадках А83 и А28. Данные на остальных площадках имеют сильное расхождение в значениях гранулометрического состава с данными, взятыми из базы Global Soil Dataset for Earth System Models.

И в заключении можно сделать вывод о том, что и другие почвенные параметры, имеющиеся в базе GSDE (теплопроводность насыщенной и сухой почвы, теплоемкость твердой фазы почвы, потенциал почвенной влаги при насыщении, коэффициент влагопроводности при насыщении) в выбранной точке совпадают с реальны-

ми, и расчет температурного режима почвы при использовании этих параметров будет проведен корректно.

Таким образом, нами были определены площадки (узлы сетки), для которых в дальнейшем будет проведено моделирование температурного режима почвы с помощью Модели Земной системы ИВМ РАН и валидация данных моделирования – сравнение результатов моделирования температурного режима почв с данными натуральных наблюдений. Модель состоит из нескольких блоков, которые описывают динамику, радиационный перенос, гравитационно-волновое сопротивление, горизонтальную диффузию, процессы конвекции и конденсации, а также пограничный слой атмосферы и процессы в почве и у ее поверхности (Володин, 2016). В работе будет использован только последний блок модели – блок деятельного слоя суши. Рассматриваемый блок является частью глобальной климатической модели.

## Литература

1. Белов Г.В., Аристова Н.М. Базы данных по свойствам веществ и материалов для ядерной энергетики // Научный сервис в сети Интернет: труды XVIII Всероссийской научной конференции (19–24 сентября 2016 г., г. Новороссийск). М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2016. С. 86–93.
2. Володин Е.М. Базовая модель динамики атмосферы // МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ. 2016. С. 13–20.
3. Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1958. 192 с.
4. Shangquan W. et al. A global soil data set for earth system modeling // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2014. Т. 6. №. 1. С. 249–263.