

ИНСТИТУТ МОНИТОРИНГА КЛИМАТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЦЕНТР ПО ПРОБЛЕМАМ ЭКОЛОГИИ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСОВ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



## МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
«XV СИБИРСКОЕ СОВЕЩАНИЕ И ШКОЛА МОЛОДЫХ  
УЧЁНЫХ ПО КЛИМАТО-ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ  
МОНИТОРИНГУ»



17-20 ОКТЯБРЯ 2023 г.

г. ТОМСК

УДК 551.5: 504  
26.234.7+20.1

Т676 Пятнадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Материалы докладов всероссийской конференции с международным участием / Под ред. Е. А. Головацкой. – Томск, 2023. – 406 с.

ISBN 978-5-6050499-1-3

В сборник включены материалы докладов по методологии и результатам исследований современного состояния и тенденций изменения климатической системы Северной Евразии и Сибирского региона. Рассмотрены научно-методические вопросы организации многокомпонентного мониторинга мезомасштабных природно-территориальных комплексов Сибири по физической, химической, биологической и техногенной компонентам системы. Представлены доклады по методологии и результатам исследований, оценке состояния и выявлению происходящих изменений в экосистемах бореальных лесов, а также по мониторингу углерода в наземных экосистемах. Рассмотрены вопросы заболачивания ландшафтов таёжной зоны. Представлены доклады о влиянии антропогенных факторов на трансформацию ландшафтов Сибири.

Сборник представляет интерес для специалистов в области климатологии, метеорологии, экологии, охраны окружающей среды, а также по физическим и техническим проблемам климато-экологических изменений.

ISBN 978-5-6050499-1-3



© Институт мониторинга климатических  
и экологических систем СО РАН, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Секция 1. Современное состояние и тенденции изменения климата Северной Евразии, динамика атмосферных процессов, экстремальные климатические явления</b>	
<i>Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Гочаков А.В., Збираник А.А., Газимов Т.Ф.</i> Динамика потенциальной завихренности умеренных широт и субтропиков для событий экстремальных осадков на юге Сибири	7
<i>Антохина О.Ю., Гочаков А.В., Зоркальцева О.С., Крупчатников В.Н.</i> Исследование геометрии контуров потенциальной завихренности на уровне 850 К: диагностический инструмент для анализа динамики средней стратосферы	11
<i>Антохина О.Ю., Збираник А.А., Мартынова Ю.В.</i> Крупномасштабные режимы циркуляции атмосферы для периодов с аномальным формированием снежного покрова в Западной Сибири	15
<i>Варламова Е.В., Соловьев В.С.</i> Реакция параметров растительного покрова на изменение климата в Восточной Сибири	19
<i>Власов В.К., Воронай Н.Н.</i> Многолетние изменения температуры почвы на территории Юго-Западного Прибайкалья	23
<i>Воронай Н.Н., Рязанова А.А., Гордова Ю.Е., Гаврилова Г.В.</i> Атмосферно-почвенные засухи на территории Томской области	26
<i>Горбатенко В.П., Яськов А.А.</i> Характеристики кучево-дождевых облаков во время формирования молний и града над Западной Сибирью	29
<i>Гришаев М.В., Пустовалов К.Н., Горбатенко В.П., Нагорский П.М.</i> Радиолокационные характеристики мезомасштабных конвективных систем над югом Западной Сибири и их связь с интенсивностью грозовой активности и осадков	33
<i>Кижнер Л.И., Масленникова Э.А.</i> Дождливые периоды в Томской области	37
<i>Кравец К.А., Нечепуренко О.Е.</i> Определение пороговых значений термодинамических индексов неустойчивости над арктическим сектором РФ	41
<i>Латышева И.В., Воложжина С.Ж., Лощенко К.А., Макухин В.Л.</i> Синоптические условия продолжительных осадков на юге Иркутской области и Забайкалья летом 2023 года	45
<i>Латышева И.В., Воложжина С.Ж., Лощенко К.А., Макухин В.Л.</i> Синоптические условия продолжительного усиления ветра на аэродромах Иркутской области и Забайкалья весной 2023 года	49
<i>Логинов С.В., Золотов С.Ю., Морару Е.И., Харюткина Е.В.</i> Оценки связи атмосферных процессов, приводящих к экстремальным значениям метеорологических переменных, на разных временных масштабах в Северном полушарии в 1980-2020 гг.	53
<i>Логинов С.В., Морару Е.И., Харюткина Е.В.</i> Тенденции экстремальных возмущений метеорологических величин в Северном полушарии в начале 21 века	56
<i>Логинов С.В., Поднебесных Н.В.</i> Вихревая циркуляция и изменчивость метеорологических переменных разного временного масштаба на территории Сибири в условиях климатических изменений	60
<i>Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.</i> Современные тенденции изменения влажности воздуха в пограничном слое атмосферы Сибирского региона	64
<i>Лушка М.В.</i> Прогноз конвективных явлений холодного периода на территории Беларуси	68
<i>Максютова Е.В., Башалханова Л.Б.</i> Погодно-климатические опасности на территории Иркутской области	72
<i>Малахова В.В.</i> Оценка скорости деградации мерзлоты на арктическом шельфе при экстремальном сценарии потепления	76
<i>Масленникова Э.А., Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В.</i> Влияние незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на антарктический полярный вихрь	80
<i>Медведев А.И., Елисеев А.В., Мохов И.И.</i> Байесовы оценки изменений стока российских рек в XXI веке на основе расчетов с ансамблем климатических моделей CMIP6	84
<i>Недобега А.П., Иванов Д.Л.</i> Изменение климата на территории Беларуси в контексте глобального потепления	87
<i>Переведенцев Ю.П., Мирсаева Н.А., Шанталинский К.М., Николаев А.А.</i> Современные климатические изменения на Европейской территории России с учетом процессов Северного полушария	91
<i>Плосков А.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И.</i> Моделирование ледовых щитов Северного полушария в следующие 100 тысяч лет	94
<i>Севастьянов В.В., Орлов П.Р., Ларионов В.О.</i> Современные изменения температурного режима приземного воздуха в Сибири	98
<i>Томишин О.А., Соловьев В.С.</i> Исследование связи эпизодов роста площади лесных пожаров в Восточной Сибири с особенностями пространственно-временной динамики атмосферы	102

<i>Харюткина Е.В., Морару Е.И., Пустовалов К.Н.</i> Характеристика метеорологических условий при развитии возгораний от гроз в Западной Сибири за период 2016–2021 гг.	106
<i>Чередыко Н.Н., Волков Ю.В., Тартаковский В.А., Гуревич Д.А.</i> Изменения структуры синхронизации в динамике приземной температуры в районе наибольшего влияния Северной Атлантики	110
<i>Чередыко Н.Н., Кузевская И.В., Волкова М.А., Горбатенко В.П., Нечепуренко О.Е., Носырева О.В., Чурсин В.В.</i> Оценка изменения характеристик заморозков для агрозоны юга Сибири в период потепления	113
<i>Чернокульский А.В.</i> Опасные атмосферные конвективные явления в России: анализ изменений по разным данным	116
<b>Секция 2. Экосистемы различных природных зон, природно-климатические изменения и процессы</b>	
<i>Арясов В.Е., Шемберг А.М., Полосухина Д.А., Панов А.В.</i> Фотоассимиляционная активность сосновых молодняков различной густоты Центральной Сибири	119
<i>Бальбина А.С., Мядзелец А.В.</i> Дендроиндикация климатических условий в Баргузинском заповеднике	123
<i>Василенко О.В., Воронай Н.Н.</i> Микроклимат ландшафтов Приморского хребта	127
<i>Грачев И.Г., Поздняков А.В.</i> К методологии исследования экологических систем	131
<i>Давыдова Н.Д., Знаменская Т.И.</i> Водные объекты Юго-Восточного Забайкалья в условиях климатических изменений	135
<i>Казанцев В.С., Кривенко Л.А., Чербунина М.Ю., Велиев А.А., Ларина А.В., Котов П.И.</i> Эмиссия метана из природных экосистем Норильского промышленного района	139
<i>Кирста Ю.Б., Трошкова И.А.</i> Среднесрочный прогноз пиков весеннего половодья на реках Алтае-Саянской горной страны	143
<i>Копысов С.Г., Кузнецов А.С.</i> Организация балансовых наблюдений за выносом углерода водными потоками на Томь-Яйском междуречье	147
<i>Куричева О.А., Варлагин А.В., Иванов Д.Г., Авилов В.К., Мамкин В.В., Желтухин А.С., Шуйская Е.А., Курбатова Ю.А.</i> Суммарное испарение заболоченного ельника центрально-лесного биосферного заповедника по данным многолетних измерений	151
<i>Маркелова А.Н., Симонова Г.В., Калашиникова Д.А.</i> Динамика изотопного состава кислорода и водорода в атмосферных осадках г. Томска в 2016-2020 гг.	155
<i>Мусохранова А.В., Михеева Н.А.</i> Динамика стока реки Нижняя Тунгуска по данным многолетних наблюдений	159
<i>Никонова Л.Г., Головацкая Е.А.</i> Скорость разложения растений-торфообразователей в торфяных залежах олиготрофных болот подверженных пирогенному воздействию на начальных этапах деструкции	163
<i>Ниязова А.В., Ильясов Д.В., Клименко В.С., Коваль А.А., Новикова Т.А., Русакова В.А.</i> Зависимость наземной фитомассы от высоты и проективного покрытия травяно-мохово-кустарничкового яруса в типичных болотных экосистемах «Мухрино»	167
<i>Придача В.Б., Семин Д.Е., Екимов Д.А.</i> Динамика свойств почв антропогенно нарушенных лесных экосистем Южной Карелии	171
<i>Придача В.Б., Семин Д.Е., Туманик Н.В., Сазонова Т.А.</i> Древесные растения Европейского Севера в условиях меняющейся природной среды	174
<i>Пупышева М.А., Бляхарчук Т.А.</i> Пожарная активность и динамика ландшафтов в предгорьях Северного Алтая с позднеледниковья до современности	177
<i>Сат С.А., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Батоцыренов Э.А., Супруненко А.Г.</i> Сравнительный анализ древесно-кольцевых хронологий Западного и Восточного Забайкалья	181
<i>Синюткина А.А.</i> Трансформация торфяной залежи в результате пожаров на осушенных верховых болотах таежной зоны Западной Сибири	185
<i>Тимошок Е.Н., Тимошок Е.Е., Савчук Д.А., Малахов Н.Г.</i> Динамика снежного покрова в горноледниковом бассейне Актру (Северо-Чуйский хребет, Русский Алтай) в XXI веке	188
<i>Ткачук Т.Е., Зайцев И.С.</i> Изменение площадей наземных биотопов торейских озер под влиянием климатических циклов	192
<i>Филимонова Е.О., Савчук Д.А., Тимошок Е.Е., Николаева С.А.</i> Динамика и состояние высокогорных лесов и лесотундрового экотона на Катунском хребте (Горный Алтай)	196
<i>Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А.</i> Оценка постпирогенной динамики гидрохимических показателей болот Западной Сибири на микроуровне	200
<i>Хорошаев Д.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О.</i> Влияние режима выпадения летних осадков и разной высоты снежного покрова на температурную чувствительность гетеротрофного дыхания почвы в условиях умеренно-континентального климата	203



<i>Хорошаев Д.А., Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н.</i> Оценка вклада гетеротрофного дыхания в годовой поток CO <sub>2</sub> из почвы хвойно-широколиственного леса и косимого луга в условиях умеренно-континентального климата	207
<i>Шефер Н.В., Бляхарчук Т.А.</i> Реконструкция растительности и пожарная история субарктической части Пур-Тазовского междуречья по данным колонки СКТ-15-3D	211
<b>Секция 3. Современные экологические проблемы и риски, техногенные системы, перенос загрязнений в окружающей среде</b>	
<i>Алемасова В.А., Ахметова А.Д.</i> Место рекультивации почв в системе устойчивого развития	215
<i>Амикишиева Р.А., Рапута В.Ф., Леженин А.А.</i> Оценка параметров траекторий дымовых шлейфов ТЭЦ по спутниковым снимкам	219
<i>Ватутин Г.Д., Филимоненко Е.А.</i> Ртуть в постпирогенных почвах лесотундры ЯНАО	223
<i>Галушин Д.А., Громов С.А.</i> Оценка выпадения сульфатов с атмосферными осадками в г. Иркутск за период 2013–2020 гг.	226
<i>Гашикова Л.П.</i> Особенности накопления элементов растениями постпирогенных болот	230
<i>Зенкова И.В., Дитц А.А., Нехаева А.А., Юсупов З.М.</i> Вырубки и гари хибин как территории локального фаунистического разнообразия	234
<i>Карелина В.И., Напреенко М.Г.</i> Картирование растительности канав в рамках сфагнового мониторинга на карбоновом полигоне «Росьянка»	238
<i>Леженин А.А., Рапута В.Ф.</i> Анализ длительного загрязнения атмосферы городов Сибири	242
<i>Леонтьева Е.А., Алексеева М.Н.</i> Проблемы лесопользования в северных территориях Карелии	246
<i>Лихачева О.Ю., Нечепуренко О.Е., Ретин А.Н., Округин С.А.</i> Перемена метеоусловий как один из факторов риска острого инфаркта миокарда у больных	250
<i>Нагорский П.М., Козлов В.И., Торопов А.А., Пустовалов К.Н., Смирнов С.В.</i> Электрические параметры и прозрачность атмосферы в городской среде при экстремально низких температурах	254
<i>Пустовалов К.Н., Ахмадалиева С.Х., Нагорский П.М., Смирнов С.В.</i> Связь приземного электрического поля и интегрального содержания аэрозоля в атмосфере на примере г. Томска	258
<i>Смирнов Н.А., Керчев И.А.</i> Зависимость сезонного развития союзного короледа <i>Ips amitinus</i> Eichh. от температурных условий окружающей среды	262
<i>Сухарева Т.А., Еришов В.В., Иванова Е.А., Поликарпова Н.В., Крюкова С.А.</i> Лесные экосистемы севера в условиях снижения эмиссионной нагрузки: данные биогеохимического мониторинга	265
<i>Федоров Д.В., Алексеева М.Н., Русских И.В., Яценко И.Г.</i> Риск воздействия факельных установок на среднетаежные ландшафты ХМАО-Югра	269
<b>Секция 4. Методы и средства мониторинга, вычислительные и информационные технологии в науках об окружающей среде</b>	
<i>Базарова А.С., Базаров А.В., Гармаев Б.З., Атутов Е.Б., Башкуев Ю.Б.</i> Информационная система мониторинга радиометеорологических параметров "Метео N"	273
<i>Богушевич А.Я.</i> Возможности измерений параметров влажности атмосферного воздуха на основе дисперсии ультразвуковых волн	277
<i>Богушевич А.Я.</i> Численные оценки влияния дисперсии звука в атмосфере на температуру воздуха, измеряемую ультразвуковыми термометрами	281
<i>Ботыгин И.А., Тартаковский В.А., Шерстнёв В.С., Шерстнёва А.И.</i> Расчет эмиссии углекислого газа при использовании облачных информационно-вычислительных платформ	285
<i>Зуев С.В.</i> Результаты опытной эксплуатации многоэлементного пиранометра	289
<i>Ильясов Д.В., Каверин А.А., Ниязова А.В., Жернов С.Н.</i> Типологическая классификация болотных ландшафтов на основе данных лидарной съёмки	293
<i>Каверин А.А., Ильясов Д.В., Куприянова Ю.В.</i> Типологическая классификация болотных ландшафтов на основе данных мультиспектральной съёмки	297
<i>Красненко Н.П., Власов Е.В., Кухта А.Е., Раков А.С.</i> Орнитологическая безопасность объектов: проблемы, решения	301
<i>Кустов О.В., Алексенко В.О., Ивлев Г.А.</i> О подходах к выбору материалов для изготовления верхнего кожуха вентиляционной установки радиометра CNR4	305
<i>Кустов О.В., Ивлев Г.А., Складнева Т.К.</i> Организация и проведение эксперимента для исследования распространения фотосинтетически активной радиации в приземном слое атмосферы и снежном покрове	308
<i>Латина Л.Э., Воропай Н.Н., Дюкарев Е.А., Каверин Д.А., Пастухов А.В.</i> Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры среды в различных географических объектах	312

<i>Логинов А.С., Золотов С.Ю.</i> Применение статистического и динамического методов для определения характеристик опасных мезомасштабных метеорологических явлений в Западной Сибири по данным моделирования WRF	316
<i>Макеев Д.А., Караваева К.Э.</i> Поиск аномалий и восстановление пропущенных данных во временных рядах геофизических параметров для различных регионов	319
<i>Матюхина А.А., Воронай Н.Н., Игнатов А.В.</i> Применение методов стохастического моделирования для восстановления рядов температуры воздуха	323
<i>Насонов С.В., Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Коханенко Г.П., Новоселов М.М., Пеннер И.Э.</i> Исследования процессов формирования и переноса аэрозольных полей атмосферы над озером Байкал на основе методов лазерного зондирования	326
<i>Немировская Л.Г.</i> Основные принципы создания и формирования банков данных площадных характеристик режима осадков, экстремальных по ряду параметров	330
<i>Пустовалов К.Н., Нагорский П.М., Оглезнева М.В., Сат А.А., Смирнов С.В.</i> Сравнительный анализ изменчивости невозмущенного приземного электрического поля в г. Томске и в пунктах экспедиционных наблюдений на юге Сибири	334
<i>Стыценок Ф.В., Барталев С.А.</i> Картографирование последствий воздействия природных пожаров на лесные экосистемы России	338
<i>Татур В.В., Тихомиров А.А.</i> Особенности измерения концентрации паров бензола и толуола с помощью анализатора ртути ДОГ-07	342
<i>Фадеева П.А.</i> Восстановление пропусков геофизических данных временных рядов методами машинного обучения и математического моделирования	346
<i>Черкашина А.А., Брюханова В.В., Кеда И.С., Ни Е.В.</i> Восстановление концентрации взвешенных частиц на основе пространственного распределения интенсивности рассеянного излучения	350
<i>Шапошников Г.И., Лыткин В.М., Хорунова А.Ю., Васильева А.Н., Павлова М.Р.</i> Опыт применения радиуглеродного датирования в изучении эоловых отложений бассейна р. Виллой	353
<b>Круглый стол «Ритм углерода». Углерод в наземных экосистемах: мониторинг</b>	
<i>Голубятников Л.Л., Заров Е.А.</i> Оценки потоков углерода в экосистемах котловинных степей Тывы	357
<i>Давыдов Д.К., Дюкарев Е.А., Плотников А.А., Фофанов А.В.</i> Исследования потоков парниковых газов в болотных экосистемах автоматизированными методами	361
<i>Дюкарев А.Г., Чернова Н.А., Никифоров А.Н., Климова Н.В., Копысов С.Г.</i> Углерод в фитогенном поле лесных экосистем	365
<i>Дюкарев Е.А., Дмитриченко А.А., Заров Е.А., Кулик А.А.</i> Мониторинг круговорота углерода в болотных экосистемах Западной Сибири (на примере болота Мухрино)	369
<i>Завалишин Н.Н., Голубятников Л.Л., Александров Г.Г.</i> Моделирование современного круговорота углерода в тундровых и лесотундровых экосистемах арктической зоны России	372
<i>Загирова С.В., Мигловец М.Н.</i> Мониторинг потоков парниковых газов в лесных и болотных экосистемах на Европейском северо-востоке России	376
<i>Иванова Е.А., Сухарева Т.А., Еришов В.В.</i> Содержание углерода и азота в компонентах лесных экосистем в Мурманской области	379
<i>Катица Е.А., Шорохова М.А., Шорохов А.А., Данилов Г.А., Корепин А.А., Тетюхин С.В.</i> Крупные древесные остатки в лесах с выраженной ветровальной динамикой: роль в формировании пулов и потоков углерода	382
<i>Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Сапронов Д.В., Мякшина Т.Н., Хорошаев Д.А., Митрохина Е.С.</i> Эмиссия CO <sub>2</sub> из почв различных экосистем Южного Подмосковья: четверть века непрерывных наблюдений	386
<i>Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Хорошаев Д.А., Сапронов Д.В., Мякшина Т.Н.</i> Температурная чувствительность дыхания почв лесных и луговых ценозов в условиях умеренно-континентального климата	390
<i>Мамкин В.В., Варлагин А.В., Татарин Ф.А., Трусова С.Н., Ясенева И.А., Курбатова Ю.А.</i> Межгодовая динамика экосистемного обмена CO <sub>2</sub> южно-таёжных ельников на торфяных и минеральных почвах	394
<i>Махныкина А.В., Полосухина Д.А., Трусов Д.В., Прокушкин А.С.</i> Эмиссионные и обменные потоки CO <sub>2</sub> с поверхности почвы в сосновых насаждениях Центральной Сибири	398
<i>Прокопюк В.М., Линкевич Е.В., Гуляева Е.Н.</i> Взаимосвязь климатических факторов и экосистемного дыхания на олиготрофном болоте заповедника «Кивач» республики Карелия	402

---

# Секция 1

## Современное состояние и тенденции изменения климата Северной Евразии, динамика атмосферных процессов, экстремальные климатические явления

---

### ДИНАМИКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАВИХРЕННОСТИ УМЕРЕННЫХ ШИРОТ И СУБТРОПИКОВ ДЛЯ СОБЫТИЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ОСАДКОВ НА ЮГЕ СИБИРИ

Антохина О.Ю.<sup>1</sup>, Антохин П.Н.<sup>1</sup>, Гочаков А.В.<sup>1,2</sup>, Збиранник А.А.<sup>1,3</sup>, Газимов Т.Ф.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Antokhina@iao.ru

<sup>2</sup>Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Новосибирск, wandering@bk.ru

<sup>3</sup>Томский государственный университет, anna24andreevna@gmail.com,  
tf.gazimov@gmail.com

Социальные и экономические последствия, вызванные наводнениями на юге Восточной Сибири (ВС) и ожидаемое увеличение экстремальных осадков на севере Евразии, подчеркнули необходимость поиска атмосферных циркуляционных паттернов, вызывающих экстремальные осадки в ВС, а также изменений в этих паттернах. Мы исследуем циркуляционные паттерны, вызывающие экстремальные осадки в ВС и Монголии, изучая неустойчивость и перенос влаги, связанные с динамикой потенциальной завихренности (PV) в течение двух временных периодов: 1982–1998 и 1999–2019 гг. Экстремальные осадки характеризуются увеличением неустойчивости тропосферы в районе выпадения осадков, которая компенсируется стабильностью вокруг этой зоны (рис. 1), с усилением переноса влаги в области летнего муссона Восточной Азии. Поле PV в субтропических регионах и средних широтах показывает усиление положительных и отрицательных аномалий PV на юго-востоке и северо-западе от озера Байкал соответственно (рис. 2). Контуры PV для экстремальных осадков имеют форму циклонического разрушения волн (CWB) и замкнутых отсеченных областей (COL) с высокими значениями завихренности (таблица 1). Экстремальные осадки, сопровождающиеся разрушением волн, характеризуются областями перераспределения стабильности и влагосодержания. Это может привести к совместному возникновению наводнений и засух, и в определенной степени является причиной ранее выявленного дипольного режима осадков над Монголией и ВС. Мы предполагаем, что произошло смещение экстремальных осадков на северо-запад, которое, вероятно, вызвано изменением распространения волн. Результаты подробно описаны в работах [1,2].

$$PV = -g \frac{\partial \theta}{\partial p} (\zeta_{\theta} + f)$$

где,  $g$  – гравитационная постоянная,  $\theta$  – потенциальная температура,  $p$  – давление,  $\zeta_{\theta}$  – относительная завихренность перпендикулярная поверхностям потенциальной температуры,  $f$  – параметр Кориолиса. Измеряется в единицах завихренности (PVU).

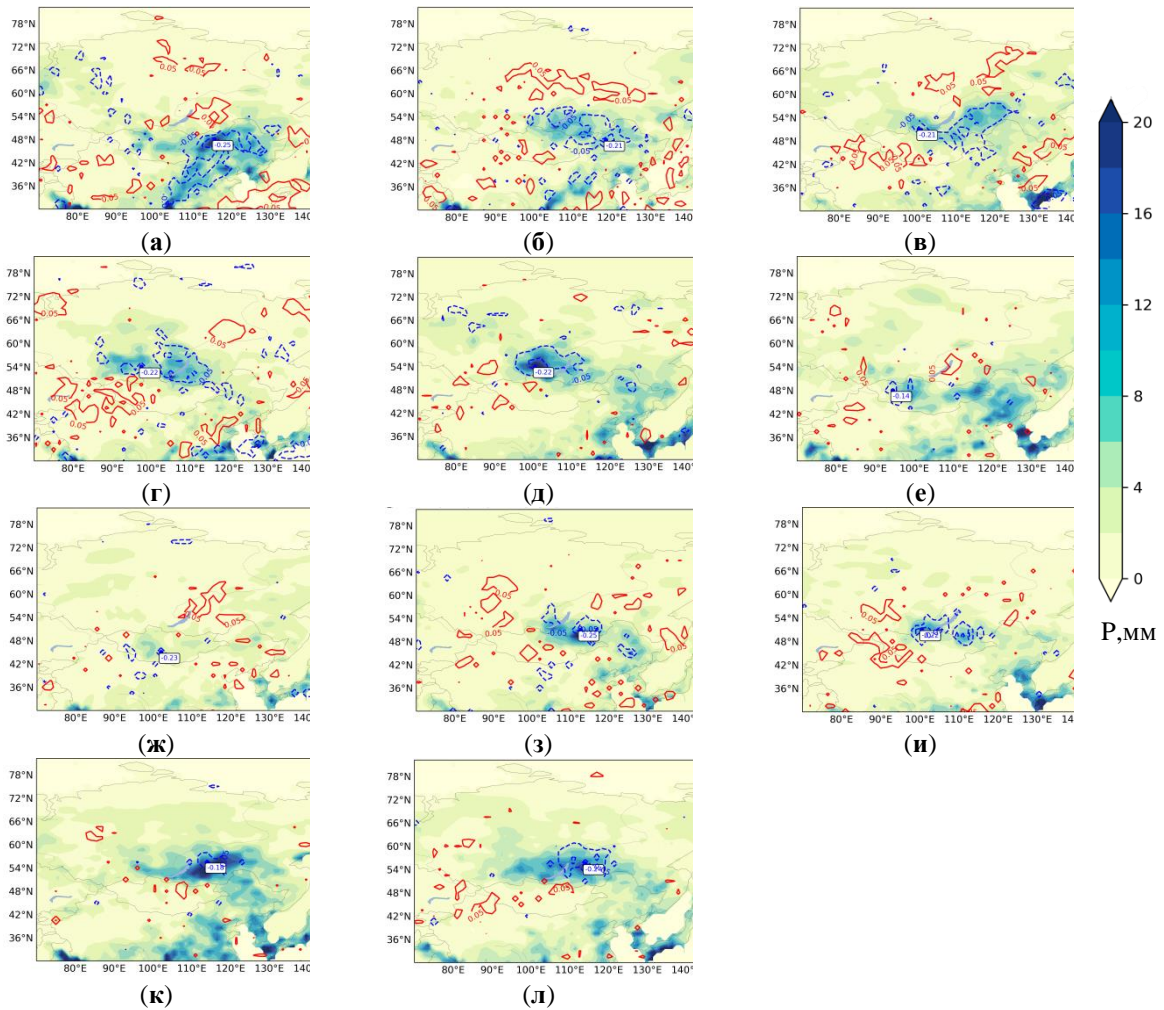


Рисунок 1. Среднее количество осадков ( $P$ , мм) и аномалии вертикальной скорости на 500 гПа (90% уровень надежности). Штриховые синие линии показывают усиление восходящих потоков, а красные сплошные - нисходящих. В белом прямоугольнике показано значение максимума восходящих движений. (а) осадки в Монголии 2 дня (1982–1998), (б) на границе Монголии и ВС 2 дня (1982–1998), (в) на границе Монголии и ВС 2 дня (1999–2019), (г) в ВС 2 дня (1982–1998), (д) в ВС 2 дня (1999–2019), (е) в Монголии 1 день (1982–1998), (ж) в Монголии 1 день (1999–2019), (з) на границе Монголии и ВС 1 день (1982–1998), (и) на границе Монголии и ВС 1 день (1982–1998), (к) в ВС 1 день (1982–1998), (л) в ВС 1 день (1999–2019).

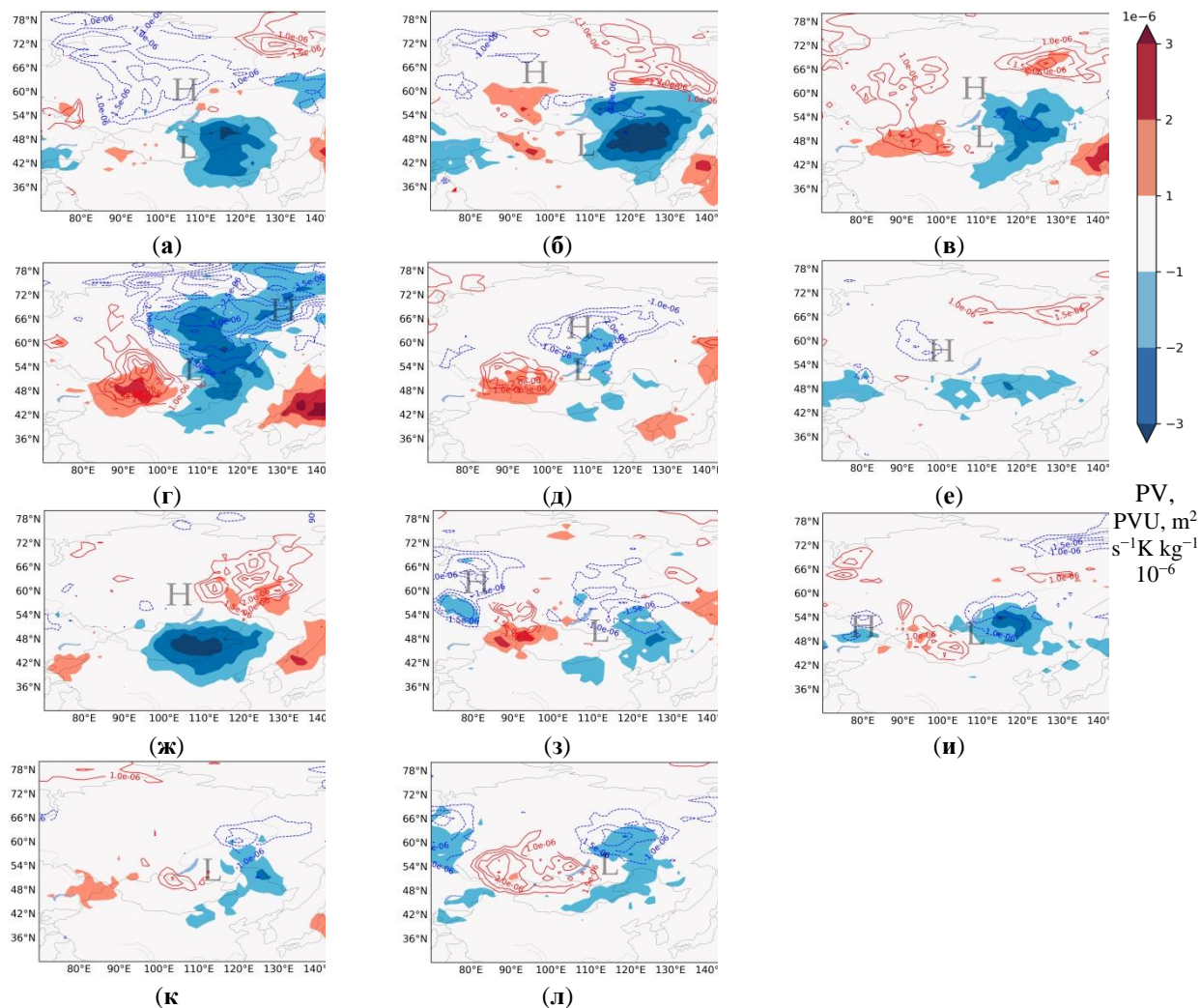


Рисунок 2. Аномалии PV на 330 К (синие штриховые линии – отрицательные, красные – положительные) и 350 К (заливка) (90% уровень надежности). Группы и периоды аналогично рис. 1. Области антициклонического и циклонического вращения показаны буквами H и L.

**Таблица 1. Формы деформации PV для событий с двухсуточными осадками. CWB - циклоническое опрокидывание, COL - замкнутая область высоких значений PV.**

M2	PV	M-BC2	PV	M-BC2	PV	BC2	PV	BC2	PV
1982–1998		1982–1998		1999–2019		1982–1998		1999–2019	
8–9.07.1984	-	30– 31.07.1982	-	6– 7.07.2001	CWB	25– 26.07.1988	CWB	7– 8.07.2000	COL
5–6.08.1988	COL	27– 28.07.1983	-	7– 8.07.2006	CWB	5– 6.07.1991	CWB	13.08.2000	CWB
27–28.08.1990	CWB	2–3.08.1984	-	29– 30.08.2008	-	1– 2.08.1992	CWB	27.07.2003	COL
21–23.07.1993	CWB	17– 18.08.1985	CWB	8– 9.08.2009	COL	5– 6.08.1993	COL	17.06.2006	CWB
8–9.07.1994	CWB	7–8.07.1990	CWB	11– 12.08.2010	CWB	20– 21.07.1995	CWB	24.07.2009	COL
27–28.07.1996	COL	21– 22.06.1994	CWB	5– 6.08.2012	-	22– 23.08.1998	CWB	13.07.2010	-
4–6.07.1998	CWB	10– 11.08.1995	COL	15– 16.07.2013	COL			26.06.2013	CWB
				19– 20.08.2017	CWB			18.07.2014	COL
				6– 7.07.2018	CWB			24.06.2019	COL
								26.07.2019	COL
								10.08.2019	CWB

Исследование выполнено при поддержке Гранта РНФ 23-27-00167 «Связь формирования экстремальных осадков на юге Сибири с процессами опрокидывания волн Россби и атмосферного блокирования».

1. Antokhina O. et al. Atmospheric Circulation Patterns Associated with Extreme Precipitation Events in Eastern Siberia and Mongolia // Atmosphere. 2023. Vol. 14, № 3. P. 480.
2. Antokhina O. et al. Effects of Rossby Waves Breaking and Atmospheric Blocking Formation on the Extreme Forest Fire and Floods in Eastern Siberia 2019 // Fire. 2023. Vol. 6, № 3. P. 122.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИИ КОНТУРОВ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАВИХРЕННОСТИ НА УРОВНЕ 850 К: ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ СРЕДНЕЙ СТРАТОСФЕРЫ

Антохина О.Ю.<sup>1,3</sup>, Гочаков А.В.<sup>1,2</sup>, Зоркальцева О.С.<sup>3</sup>, Крупчатников В.Н.<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Antokhina@iao.ru

<sup>2</sup>Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Новосибирск, wandering@bk.ru

<sup>3</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, meteorologist-ka@yandex.ru

<sup>4</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, vkрупчатников@yandex.ru

Циркуляция в зимней стратосфере определяется стратосферным полярным вихрем (СПВ). В работе [1] было показано, что сильные западные ветры в стратосфере способствуют проникновению планетарных волн из тропосферы. Эти квазистационарные волны при опрокидывании добавляют значительную изменчивость в стратосферную циркуляцию [2-4]. Наиболее значимым событием, связанным с опрокидыванием волн являются внезапные стратосферные потепления (ВСП) [4,5], представляющие собой резкие крайние нарушения СПВ при которых температура в полярной стратосфере нагревается на десятки градусов.

Наиболее простой способ увидеть динамику в периоды потеплений являются карты потенциальной завихренности (PV) [2,4]. Предполагая, что практически весь градиент полярного вихря сосредоточен на кромке вихря, и пренебрегая эффектами трения и диабатикой, мы приходим к простой модели эволюции СПВ как консервативной величины. Эволюция таких величин полностью определяется эволюцией их контуров, которые разделяют различные значения этих величин [3].

$$PV = -g \frac{\partial \theta}{\partial p} (\zeta_{\theta} + f)$$

где,  $g$  – гравитационная постоянная,  $\theta$  – потенциальная температура,  $p$  – давление,  $\zeta_{\theta}$  – относительная завихренность перпендикулярная поверхностям потенциальной температуры,  $f$  – параметр Кориолиса. Измеряется в единицах завихренности (PVU).

Анализ PV является мощным инструментом, который часто используется для изучения обрушения стратосферных волн и их воздействия на полярный вихрь. PV – это сохраняющаяся величина в атмосфере, которая измеряет градиент абсолютной завихренности (мера вращения частиц воздуха) вдоль поверхностей с постоянной потенциальной температурой. Карты PV можно использовать для диагностики силы и местоположения полярного вихря, а также степени разрушения волн в стратосфере.

В работе [5] представлен архив карт PV для уровня 850 К (~30 км) на основании данных реанализа Era-5 [6]. Эти карты находятся в свободном доступе по ссылке <https://doi.org/10.5281/zenodo.7450999>. Как становится понятно из краткого введения приведенного выше, анализ контуров PV может помочь в оценке большинства параметров СПВ в т.ч. площади и особенностей опрокидывания. В первую очередь мы предлагаем взглянуть на возможности оценки площади контуров PV для оценки изменений вихря. На рис. 1 показаны средние положения контуров PV в период 1979-2021 гг. В качестве границ вихря можно исследовать диапазон от 450 до 700 PVU. Основная сложность работы с СПВ по сравнению с тропосферным полярным вихрем заключается в том, что СПВ может существенно отклоняться от полюса или же расщепляться. Для того



чтобы в этих случаях метод продолжал успешно анализировать геометрию контуров первоначально мы произвели интерполяцию к равновеликой проекции Ламберта с центром на полюсе, чтобы получить замкнутый контур без искажения при переходе нулевого меридиана. Затем мы анализируем контуры с точки зрения наличия точки полюса в них, на основании этого далее выстраивается анализ геометрии.

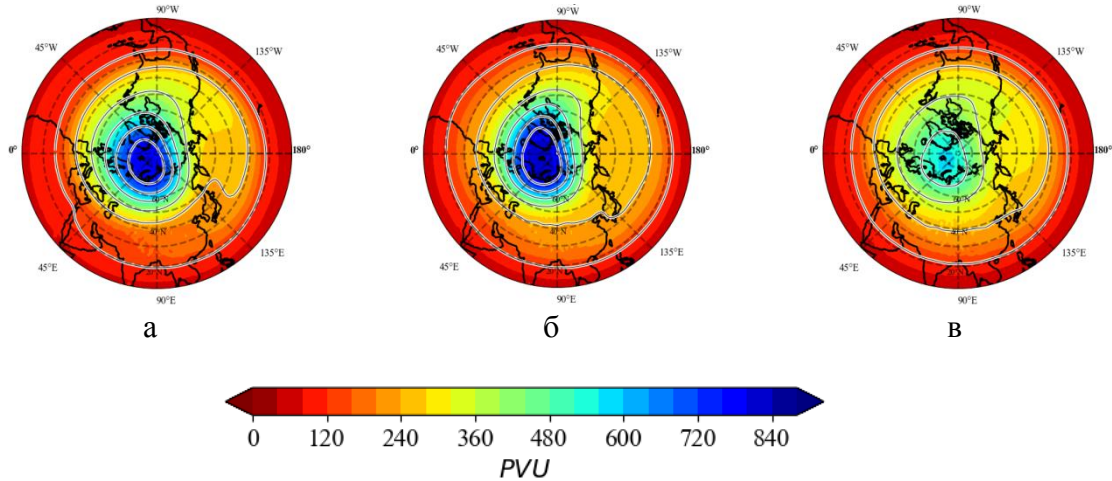


Рисунок 1. Средние контуры PV на 850 К. а – ноябрь, б – январь, в – март.

Результат анализа представлен в виде графика (рис. 2) иллюстрирующем изменчивость площади вихря, определенная на основании изолинии 450 PVU для нескольких зимних сезонов.

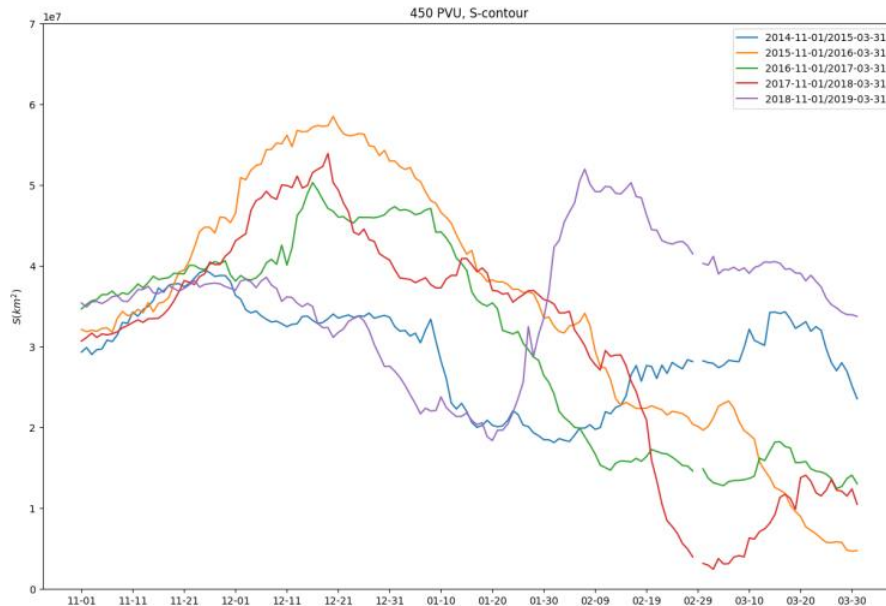


Рисунок 2. Изменение площади вихря в пределах изолинии 450 PVU. Синяя кривая – 2014-2015 гг., оранжевая – 2015-2016 гг., зеленая – 2016-2017 гг., красная – 2017-2018 гг., фиолетовая – 2018-2019 гг.

Здесь мы видим одинаковые значения площади вихря вплоть до 21 ноября для всех сезонов, затем для каждого периода наблюдается свой сценарий. За исключением 2014-2015 и 2018-2019 гг. максимальные площади изолинии 450 PVU приходятся на декабрь.



Резко площадь вихря меняется в периоды ВСП и после событий ВСП: в период февраля 2018, а также в январе 2019 г.

Анализ контуров PV позволяет также анализировать опрокидывания планетарных волн. На рис. 3 показан яркий пример опрокидывания в период начала декабря 2016 г. Видно, что при адвекции воздуха из тропиков с низкими значениями PVU СПВ отклоняется от полюса, в свою очередь его воздушные массы адвектируются в тропики. Перемешивание воздушных масс в «хвосте» вихря при опрокидывании формирует т.н. «зону прибоя» (Surf zone) или область малых градиентов завихренности [2]. На основании алгоритма [7], позволяющем анализировать контуры PV на наличие антициклонического типа (АС-тип) опрокидываний волн, мы исследовали все контуры от 0 до 400 PVU для 6 декабря. Мы обнаружили, что АС-тип опрокидывания волн отмечается уже с 60 PVU, однако наиболее четко структуру опрокидывания видно для контуров от 120 до 400 PVU. Так, опрокидывание на низких уровнях начинается в западной полушфере и на верхних уровнях заканчивается над Северной Америкой – процесс полностью огибает Северное полушарие, что согласуется с результатами [8].

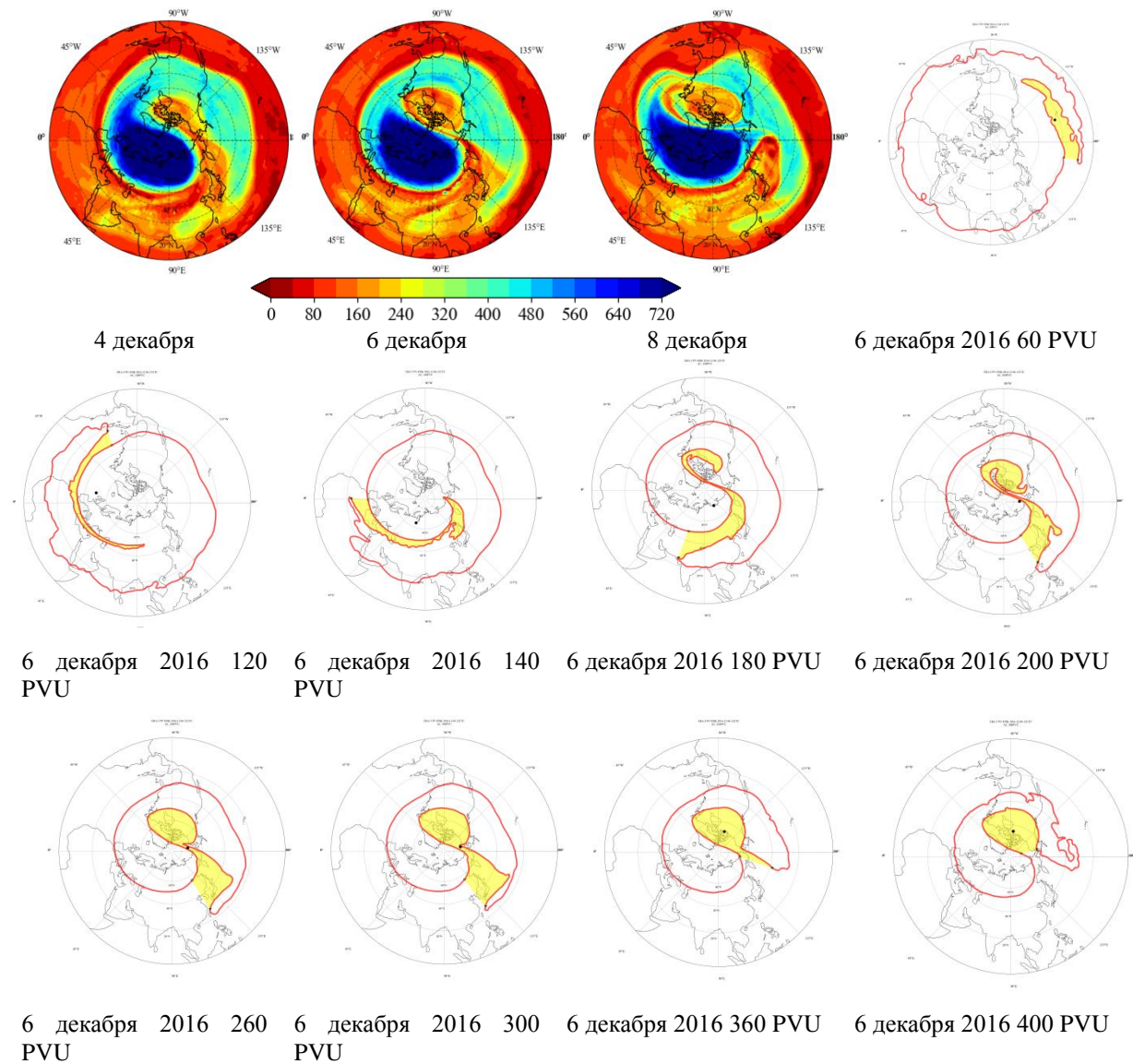


Рисунок 3. Примеры первичных (elementary) опрокидываний.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 22-77-10008 «Исследования крупномасштабных явлений в нижней и средней атмосфере и оценка их локального проявления на высотах мезосферы-нижней термосферы», обработка и хранение данных реанализа выполнено при поддержке сервера ИОА СО РАН в рамках Госзадания, а также Госзадания ИВМиМГ СО РАН (0251-2022-0003).

1. Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // *Journal of Geophysical Research*. 1961. Vol. 66, № 1. P. 83–109.
2. McIntyre M.E., Palmer T.N. Breaking planetary waves in the stratosphere // *Nature*. 1983. Vol. 305, № 5935. P. 593–600.
3. Krupchatnikov V.N., Borovko I.V. Rossby wave breaking and blocking events associated with some atmospheric circulation regimes in the Northern Hemisphere based on a climate system model (PlaSim-ICMMG-1.0) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 611. P. 012015.
4. Baldwin M.P. et al. Sudden Stratospheric Warmings // *Reviews of Geophysics*. 2021. Vol. 59, № 1.
5. Зоркальцева О. С., Антохина О. Ю., Антохин П. Н. Долговременная изменчивость параметров внезапных стратосферных потеплений по данным реанализа ERA5 // *Оптика атмосферы и океана*. 2023. Т. 36. № 03. С. 200–208. DOI: 10.15372/AOO20230306.
6. Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146, № 730. P. 1999–2049
7. Gochakov A.V. et al. Method for Identifying and Clustering Rossby Wave Breaking Events in the Northern Hemisphere // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021. Vol. 46, № 1. P. 10–18.
8. Knox J.A., Harvey V.L. Global climatology of inertial instability and Rossby wave breaking in the stratosphere // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2005. Vol. 110, № D6. P.

## КРУПНОМАСШТАБНЫЕ РЕЖИМЫ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ПЕРИОДОВ С АНОМАЛЬНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

*Антохина О.Ю.<sup>1</sup>, Збиранник А.А.<sup>1,2</sup>, Мартынова Ю.В.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.И. Зуева СО РАН, г. Томск, Antokhina@iao.ru

<sup>2</sup>Томский государственный университет, anna24andreevna@gmail.com

<sup>3</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
FoxyJ13@gmail.com

Формирование снежного покрова (СП) в Северном полушарии является значимым процессом с точки зрения климата и погодных условий [1]. Особое значение имеет формирование СП в Сибири, так как здесь он имеет максимальные площади и влагосодержание [2]. В настоящий момент существует как минимум две теории, связывающие аномалии СП в Северном полушарии и циркуляционные процессы в атмосфере в осенне-зимний период. Одна из теорий описывает механизм связи через изменение альbedo подстилающей поверхности и усиление от нее волновых потоков, связанных с быстрыми процессами формирования СП [3]. Однако этот механизм подтверждается не во всех данных и подходах. Показано, что проявление аномалий СП может быть результатом уже существующих аномалий циркуляции атмосферы [4]. Выявлено, что периодам с аномальным формированием СП в октябре-ноябре предшествует аномальная циркуляция в сентябре [5]. Таким образом, сделано предположение, что аномалии циркуляционного режима нарастают, начиная с сентября, и как следствие приводят к аномальному режиму в зимний период. В настоящее время существуют предпосылки, которые позволяют объединить процессы, летом и ранней осенью, циркуляцию поздней осенью, в том числе влияющей на снежный покров, стратосферную циркуляцию с формированием внезапных стратосферных потеплений (ВСП), а также последующий отклик на эти процессы в поздние зимние месяцы с января по март. Так в 2020 году коллектив авторов показал, что значительный нагрев в российском секторе Арктики может приводить к формированию блокирования в ноябре, что в свою очередь влияет на усиление волновых потоков в стратосферу и раннему формированию ВСП с последующим нисходящим откликом в тропосферу во вторую половину зимнего периода [6]. Вероятнее всего, при этом циркуляционные процессы, связанные с опрокидываниями волн и адвекцией тепла, в осенний период должны быть аномальными и приводить как к формированию блокирования, так и аномалиям СП. Таким образом, в этой цепочке, как аномалии снега, так и усиление волнового потока в стратосферу будет являться следствием аномалий циркуляции и установления режима блокирования. В представленной работе, на основе анализа аномалий СП в Западной Сибири (ЗС), мы анализируем связанные с ними аномалии циркуляции атмосферы и последующие условия циркуляции в стратосфере.

Для исследования использовались спутниковые данные о протяженности снежного покрова NOAA (SCE) с пространственным разрешением 190.6 км, и охватывающие период с 4 октября 1966 г. по настоящее время с недельным разрешением по времени [7]. Была оценена протяженность СП, сформировавшаяся к концу каждого месяца для территории ЗС: 50-70° с.ш., 60-90° в.д., как разница между протяженностью текущего месяца и предыдущего. Даты выпадения осадков уточнялись при помощи данных архива GPCC. Суточные данные доступны с января 1982 г. с пространственным разрешением 1\*1° сетки [8].

По данным о максимальной протяженности СП были получены годы, когда снежный покров был сформирован на территории Западной Сибири в октябре (1976, 2001,

2009, 2011, 2014 и 2016 гг.) и в ноябре (1980, 1983, 1984, 1987, 1991 гг.). Для этого отбирались месяцы, в которых максимальная протяженность СП превышала 90 перцентиль.

Аномалии интенсивности установления СП связаны с аномалиями циркуляции в осенний период. Как уже упоминалось выше, эти аномалии могут быть связаны с процессами формирования атмосферного блокирования. Чтобы проследить цепочку взаимосвязей, для каждого из отобранных месяцев были посчитаны периоды и центральная долгота блокирования на территории Евразии в осенне-зимний период. Периоды блокирования получены при помощи расчета индекса GHGS [9] по данным реанализа ERA5 [10]. В результате получено, что всем событиям аномалий СП в октябре предшествует блокирование в области Европы или Урала в сентябре (таблица 1). Также во всех событиях за исключением 2001 и 2009 гг. блокирование наблюдалось и в октябре одновременно с периодами выпадения осадков в ЗС.

**Таблица 1. События с аномалиями СП на территории ЗС.**

Год	Периоды с осадками (числа)	Периоды блокирования	Центральная долгота блокирования	ВСП (период и тип)
Октябрь				
1976	-	-	-	-
2001	02-03, 7-12, 16-18, 23, 25-27	15.09-21.09 20E, 23.11-30.11 40E, 05.12-20.12 20E	14.09-18.09 70E	22.12-10.01 D 30.01-18.02 S
2009	02-07, 10-12, 15-22, 25-26	02.09-08.09 70E, 31.10-07.11 30E	07.09-16.09 20E	18.01-06.02 D
2011	01-02, 05-12, 17-18, 21-23, 27	11.09-15.09 100E, 14.10-19.10 30E, 05.11-15.11 40E	27.09-02.10 20E, 22.10-30.10 20E	29.01-05.02 D
2014	02-05, 10-12, 15-26	01.09-15.09 20E, 22.10-29.10 30E, 14.11-20.11 10E	05.10-09.10 40E	05.02-13.02 S 14.03-31.03 F
2016	01-02, 05-08, 11-13, 23-24, 31	05.09-11.09 20E, 03.10-13.10 40E, 19.11-25.11 60E	12.09-20.09 30E	26.01-17.02 F 04.03-30.03 F
Ноябрь				
1980	-	07.10-17.10 60E, 03.11-15.11 30W, 12.12-01.01 160E	31.10-08.11 10E, 01.12-12.12 140E	18.02-16.03 D
1983	02-05, 08, 11-20	07.11-18.11 20W, 18.12-31.12 170W	01.12-06.12 30E	27.01-02.02 S 22.02-05.03 F
1984	01-05, 14-16, 27-30	31.10-06.11 40E, 12.12-27.12 70E	10.11-20.11 50E	29.12-15.01 S 19.02-20.03 D
1987	03, 07-09, 15-18, 22-23, 29-30	08.10-31.10 70E, 17.11-01.12 170E	22.11-30.11 10E	06.12-25.12 S 16.01-14.02 D
1991	2-6, 13, 27-30	02.10-12.10 30E, 28.10-10.11 170W, 06.12-12.12 20E	21.10-31.10 40E	17.01-14.02 S

Был проведен анализ аномалий поля геопотенциала на изобарической поверхности 500 гПа относительно среднего за период 1991-2021 г. при помощи ресурса NOAA Daily Mean Composites [11] для всех отобранных событий. Показано, что при формировании СП в октябре над ЗС наблюдался максимум отрицательных значений отклонений геопотенциала для событий 1976, 2001, 2014 гг. (рис. 1). В октябре 2011 и 2016 гг. отрицательные значения затрагивали лишь южные районы рассматриваемой территории. В большинстве случаев максимум положительных отклонений находился к западу и северо-западу от области минимума, в районе Баренцева моря и Скандинавии. Наиболее исключительным случаем с точки зрения аномалий поля давления являлось событие 2009 года.

Здесь большая часть ЗС, за исключением северных территорий, находилась под областью положительных аномалий с максимумом над морем Лаптевых, а отрицательные значения сосредоточены над районами Баренцева и Карского морей и Европы (рис. 1в).

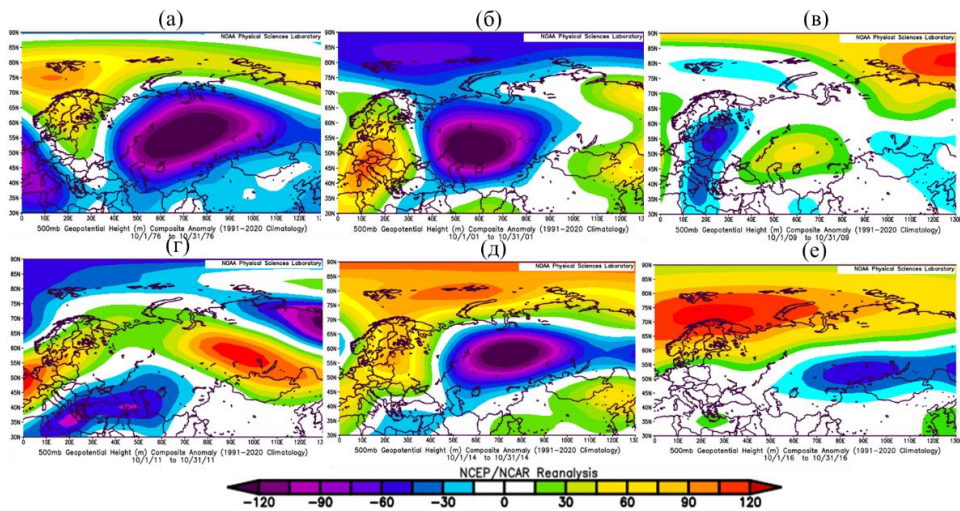


Рисунок 1. Аномалии поля геопотенциала на уровне 500 гПа для событий в октябре

Были также проанализированы циркуляционные особенности в период установления снежного покрова в ноябре. Формирование СП в ноябре сопровождается блокингом в октябре и ноябре над районами Европы, кроме 1983 г., где блокирование в восточной полушере отмечалось только в декабре. Основное отличие от октябрьских событий состоит в положении отрицательных аномалий геопотенциала в районе Баренцева и Карского морей, захватывая с севера территорию Сибири. Исключение составляют 1984 и 1987 гг., где положительные аномалии распространяются на Баренцево море с максимумом над Скандинавией (рис. 2в и 2г).

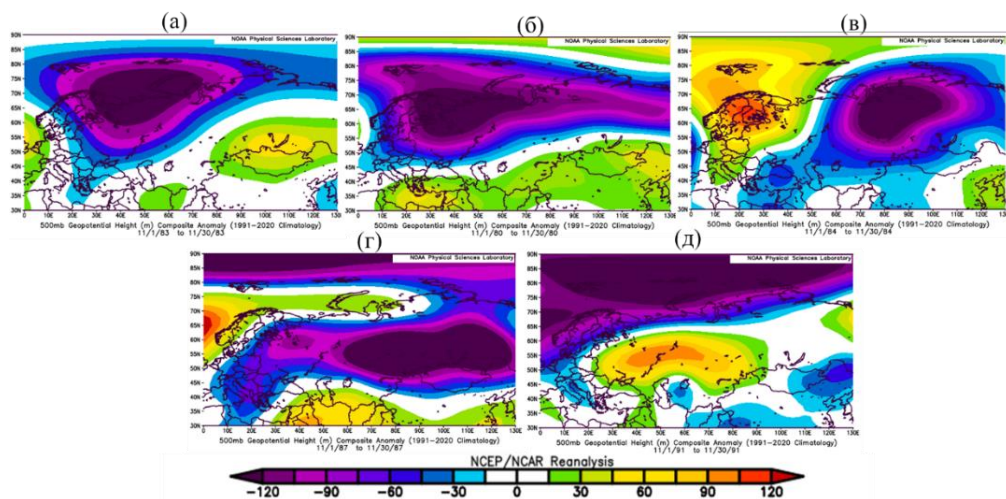


Рисунок 2. Аномалии поля геопотенциала на 500 гПа для событий в ноябре

Циркуляционные процессы, связанные с аномалиями формирования СП были проанализированы с точки зрения их влияния на стратосферную циркуляцию и возникновения ВСП последующей зимой. Анализ стратосферной циркуляции выполнен на основании работы [12]. В данной работе рассматривались как сильные (major), так и незначительные (minor) ВСП. В каждом рассматриваемом году отмечались одно или два эпизода



ВСП (таблица 1). Всем событиям предшествовало блокирование в ноябре-декабре в районе 10-60° в.д.

В первую половину зимы ВСП наблюдались только в 1984, 1987 и 2001 гг. В эти годы формирование СП сопровождалось блокингом в районе 40-70° в.д. в ноябре. Даты начала ВСП в декабре наступали спустя 1-5 суток после даты разрушения блокинга. Поле аномалий геопотенциала для этих событий имеет схожую конфигурацию. Области положительных значений на северо-западе Европы замкнуты с двух сторон областями максимума отрицательных отклонений над ЗС и Атлантикой. Возможно, такая конфигурация аномалий барического поля в средней тропосфере может быть благоприятна для распространения волновой энергии в более верхние слои и влияния на стратосферную циркуляцию в первую половину зимы.

В результате показано, что аномалии циркуляционного режима ранней осенью, связанные с формированием блокингов, способствуют установлению холодного режима на территории Западной Сибири в октябре-ноябре и раннему установлению снежного покрова. Можно предположить, что дальнейшие аномалии циркуляции при определенной конфигурации барического поля в средней тропосфере могут оказывать влияние на стратосферную циркуляцию и раннему формированию ВСП.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ, Грант 22-77-10008 «Исследования крупномасштабных явлений в нижней и средней атмосфере и оценка их локального проявления на высотах мезосферы-нижней термосферы», данные о протяженности снежного покрова на территории Западной Сибири получены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание ИМКЭС СО РАН, регистрационный номер проекта 121031300158-9).

1. Groisman P. Y., Karl T. R., Knight R. W. and Stenchikov G. L. Changes of snow cover, temperature, and radiative heat balance over the Northern Hemisphere // *Journal of Climate*, 1994. V. 7, No. 11. P.1633-1656.

2. Song L., Wu R. Interseasonal snow cover variations over western Siberia and associated atmospheric processes // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2019. V. 124. P. 8994–9010.

3. Cohen J., Barlow M., Kushner P. J. and Saito K. Stratosphere-troposphere coupling and links with Eurasian land-surface variability // *Journal of Climate*, 2007. V. 20. P. 5335-43.

4. Peings, Y., Douville, H., Colin, J., Martin, D. S. and Magnusdottir, G. Snow-(N) AO teleconnection and its modulation by the Quasi-Biennial Oscillation // *Journal of Climate*, 2017. V. 30(24). P.10211-10235.

5. Мартынова Ю. В., Крупчатников В. Н., Гочаков А. В., Антохина О. Ю. Взаимосвязь аномалий интенсивности формирования снежного покрова в Западной Сибири с динамическим состоянием атмосферы в северном полушарии в осенне-зимний период // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2022, Т. 58, № 1, С. 109–124

6. Chen, X., Luo, D., Wu, Y., Dunn-Sigouin, E., & Lu, J. Nonlinear response of atmospheric blocking to early winter Barents-Kara Seas warming: An idealized model study // *Journal of Climate*, 2020. P. 1–42.

7. Estilow T. W., Young A. H., 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. №. 1. P. 137-142.

8. Schneider U., Finger P., Rustemeier E., Ziese M., Becker A. Global Precipitation Analysis Products of the GPCC // *Global Precipitation Climatology Centre*, 2021. 17 pp.

9. Tibaldi S. Molteni F. On the operational predictability of blocking // *Tellus*. 1990. V. 42A. P. 343-365.

10. Hersbach, H., et. al. The ERA5 Global Reanalysis // *Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. V. 146. P. 1999–2049.

11. The NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL) Daily Mean Composites [Электронный ресурс]. URL: <https://psl.noaa.gov/data/composites/day/> (дата обращения 17.06.2023).

12. Zorkaltseva O. S., Antokhina O. Y., Antokhin P. N. Long-Term Variations in Parameters of Sudden Stratospheric Warmings According to ERA5 Reanalysis Data // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2023. V. 36. №. 4. P. 370-378.

## РЕАКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

*Варламова Е.В., Соловьев В.С.*

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
г. Якутск, varlamova@ikfia.ysn.ru

Основной экологической проблемой современности является изменение климата, вызванное глобальным потеплением. На евразийском материке наибольшие значения тренда глобального потепления приходится, в основном, на Восточную Сибирь (Якутию) и частично на север Западной Сибири [1–3]. К наиболее быстро реагирующим на изменения внешних условий компонентом природной среды является растительный покров, который, в свою очередь, играет важную роль в изменении климата. Для северных регионов с огромной территорией и ограниченной доступностью, данные дистанционного зондирования прекрасно дополняют наземные системы сбора информации, а в некоторых случаях являются единственным источником информации о происходящих изменениях. Целью данной работы является исследование динамики интегрального вегетационного индекса (TIN) и начала сезона вегетации (SOS) растительного покрова Восточной Сибири в условиях глобального потепления климата по данным ДЗЗ.

На основе глобальных композитов 15-дневных NDVI (продукт GIMMS NDVI3g, 1982-2015 гг. [4]) были рассчитаны ежегодные значения интегрального вегетационного индекса TIN (Time integrated NDVI) и дат начала сезона вегетации SOS (Start of season). TIN, рассчитываемый как сумма 15-дневных значений NDVI за период май-сентябрь, отражает общее состояние растительности за вегетационный период. Даты SOS были определены согласно методам, описанным в работах [5-6]. Ежегодные даты схода снежного покрова (snowmelt) рассчитывались по данным сети метеостанций [7], на которых проводились ежедневные наблюдения за снежным покровом. Датой схода снежного покрова считался день года, когда значение высоты снега в окрестности метеостанции опускалось до уровня 0 см. Для расчета продолжительности «теплых дней» (TSL – количество дней в году между датами устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через +10°C весной и осенью) были использованы данные реанализа ERA-Interim [8] по приземной температуре воздуха.

За рассматриваемый период на большей части Восточной Сибири наблюдается значительное изменение TIN. Карта пространственного распределения линейного тренда TIN за 1982-2015 гг. показана на рис. 1а. Как следует из рис. 1а, на исследуемой территории преобладает положительная тенденция TIN. Прирост значений TIN в среднем по Восточной Сибири составил ~ 4%. При этом статистически значимые ( $p < 0.05$ ) положительные тренды занимают ~ 57% исследуемой территории, тогда как значимые отрицательные тренды занимают всего ~ 2% территории.

Анализ пространственного распределения тренда TIN выявил область с наиболее высокими ( $> 0,03$  в год) значениями тренда. Эта область (ROI) расположена на севере Восточной Сибири выше 65-й параллели северной широты, на севере Якутии. Граница ROI на рис. 1а показана сплошной черной линией. Среднее значение тренда TIN на территории ROI составило  $11 \pm 2\%$ , прирост которого произошел в основном за счет увеличения NDVI в мае (на  $17 \pm 10\%$ ) и июне (на  $13 \pm 6\%$ ). Вместе с тем, наиболее высокий и значимый рост (на  $2,5-3,4^\circ\text{C}$ ) температуры воздуха в означенной территории также наблюдается в мае и в июне. Показано, что между вариациями NDVI и температуры в эти месяцы наблюдается высокая корреляция ( $R=0,84$  в мае,  $R=0,89$  в июне).

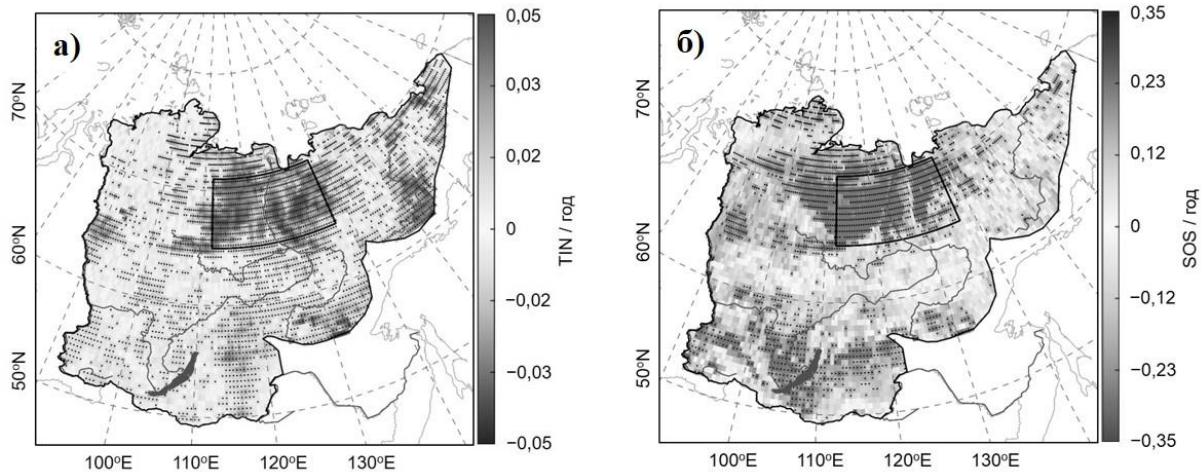


Рисунок 1. Пространственное распределение тренда TIN (а) и SOS (б) на территории Восточной Сибири за 1982-2015 гг. Точками отмечены области с  $p < 0.05$ . Черной линией выделена область ROI.

Как показано на рис. 1б, на исследуемой территории за 1982-2015 гг. преобладают отрицательные тренды SOS, которые свидетельствуют о тенденции более раннего начала вегетационного сезона. Сдвиг SOS на более ранние даты в среднем по Восточной Сибири составил  $\sim 5$  дней. Статистически значимые отрицательные тренды занимают  $\sim 35\%$  исследуемой территории, тогда как значимые положительные тренды занимают всего  $\sim 0,2\%$  территории. Наиболее высокие значимые отрицательные тренды наблюдаются в основном на севере Восточной Сибири (преимущественно на севере Якутии) и на юге Восточной Сибири (в районе озера Байкал). Сдвиг SOS на более ранние даты в среднем на территории ROI составил  $11 \pm 5$  дней и обусловлен ростом (на  $3.4 \pm 1.6^\circ\text{C}$ ) температуры воздуха в мае, и соответственно более ранним таянием снежного покрова (на  $12 \pm 6$  дней).

Следует отметить, что на территории Восточной Сибири за рассматриваемый период наблюдается рост среднегодовой температуры воздуха, среднее значение которого составило  $1.5 \pm 0.7^\circ\text{C}$ . Наиболее высокие и статистически значимые тренды температуры охватывают преимущественно северо-восточную часть Восточной Сибири (рис. не приведен). Также на севере Восточной Сибири было выявлено увеличение количества теплых дней (TSL) [9]. В работе [9] было показано, что наиболее высокие и статистически значимые положительные тренды TSL преимущественно локализованы на севере Якутии. Среднее значение тренда TSL по территории ROI составило  $30 \pm 11$  дней и обусловлено за счет тенденции более раннего (на  $15 \pm 8$  дней) начала и позднего (на  $17 \pm 10$  дней) окончания продолжительности теплых дней.

На рис. 2а показаны аномалии TIN и TSL относительно среднемноголетних (1982-2015), усредненные по территории ROI. Ежегодные аномалии TIN в течение исследуемого периода показывают, что наиболее устойчивый рост TIN наблюдается с 2004 г., где также отмечены положительные аномалии TSL. Вместе с тем, на территории ROI с 2004 г. наблюдаются отрицательные аномалии SOS, которым соответствуют отрицательные аномалии snowmelt (рис. 2б). В течение всего исследуемого периода между вариациями SOS и snowmelt отмечается тесная связь ( $R=0,92$ ).



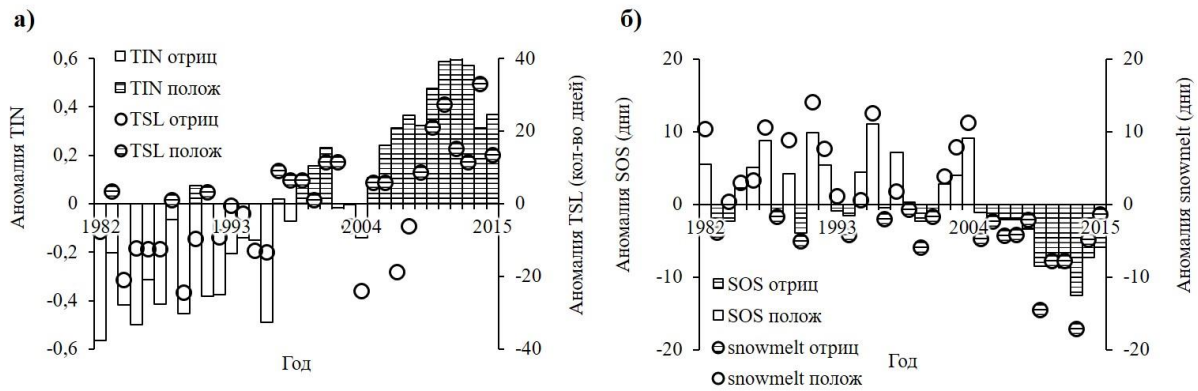


Рисунок 2. Аномалии: а) TIN и TSL, б) SOS и snowmelt относительно среднеголетних, усредненные по территории ROI за 1982-2015 гг.

На территории Восточной Сибири за 1982-2015 гг. в среднем преобладает положительная ( $4 \pm 1\%$ ) тенденция TIN и отрицательная ( $-5 \pm 3$  дней) тенденция SOS на фоне роста среднегодовой температуры воздуха ( $на 1.5 \pm 0.7^\circ\text{C}$ ) и атмосферных осадков ( $на 34 \pm 17$  мм). Наиболее высокий значимый рост TIN ( $на 11 \pm 2\%$ ) наблюдается на севере Якутии, где также происходит значимый сдвиг SOS ( $на 11 \pm 5$  дней) на более ранние даты. Максимальный устойчивый прирост TIN и сдвиг SOS на более ранние даты отмечается в течение последних  $\sim 10$  лет (после 2004 г.). Показано, что эти изменения обусловлены повышением приземной температуры воздуха в мае ( $на 3.4 \pm 1.6^\circ\text{C}$ ) и июне ( $на 2.5 \pm 1.4^\circ\text{C}$ ), увеличением ( $на 30 \pm 11$  дней) количества теплых дней с температурой  $>10^\circ\text{C}$  и более ранним ( $на 12 \pm 6$  дней) таянием снежного покрова.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКТР 122011700172-2).

1. Field C.B., Barros V.R. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change. Climate change 2014. – New York: Cambridge university press, 2014.

2. Gorokhov A.N., Fedorov A.N. Current Trends in Climate Change in Yakutia // Geography and Natural Resources. – 2018. – Vol. 39. – № 2. – P. 153–161.

3. Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Communications Earth & Environment. – 2022. – Vol. 3. – № 1. – P. 1–10.

4. Pinzon J., Tucker C. A Non-Stationary 1981–2012 AVHRR NDVI3g Time Series // Remote Sensing. – 2014. – Vol. 6. – № 8. – P. 6929–6960.

5. White M.A. et al. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006 // Global Change Biology. – 2009. – Vol. 15. – P. 2335–2359.

6. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Особенности пространственно-временных вариаций вегетационного индекса NDVI в Сибири (1982-2015) / Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXVIII Международного симпозиума [Электронный ресурс]. – Томск: ИОА СО РАН – 2022. – С. D204-207.

7. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных «Характеристики снежного покрова на метеорологических станциях России и бывшего СССР». Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621201.

8. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B.,

Hersbach H., Hólm E.V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2011. – Vol. 137. – № 656. – P. 553–597.

9. Варламова Е.В., Соловьев В.С. Многолетняя динамика вегетационного индекса растительности Сибири в условиях глобального изменения климата // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIX Международного симпозиума [Электронный ресурс]. – Томск: ИОА СО РАН. – 2023. – С. D46-49.

## МНОГОЛЕТНИА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЧВЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ

*Власов В.К.<sup>1</sup>, Воронай Н.Н.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт Географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, vlasovslava1@mail.ru

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
voronay\_nn@mail.ru

Начиная с середины 1960-х гг. в России преимущественно отмечается потепление климата. Эта тенденция описана разными авторами. Рост среднегодовой температуры приземного воздуха в регионе Прибайкалье–Забайкалье существенно превышает глобальный рост [4].

Повышение температуры воздуха оказывает влияние на состояние грунтов в зоне многолетней мерзлоты России, которая занимает более 65 % территории РФ и охватывает значительную часть Сибири и Дальнего Востока. В пределах криолитозоны России сосредоточено более 30% разведанных запасов всей нефти страны и около 60% природного газа. Здесь создана дорогостоящая и уязвимая инфраструктура: нефтегазопромысловые объекты, магистральные нефте и газопроводы протяженностью в тысячи километров. Изменение состояния грунтов оказывает влияние на инженерно-технические сооружения и в целом на окружающую среду.

В последнее десятилетие с развитием цифровых технологий, а также освоением северных территорий увеличились натурные исследования за мерзлотно-термическим режимом грунтов. Мало изученным остаются факторы, влияющие на этот режим: растительный и снежный покровы, осадки, литологический состав и др.

Оценка современного состояния и изменений во времени мерзлотно-термических характеристик почв Прибайкалья весьма актуальна.

Гидрометстанция Тунка организована в 1888 г Восточно-Сибирским отделением географического общества, высота определена и равна 722 м. Станция расположена в Тункинской тектонической котловине, находящейся на юго-востоке обширной горной области Восточного Саяна, на левом берегу реки Тунки, которая в 2 км южнее станции впадает слева в основную реку района Иркут. Абсолютная высота гор достигает 2600 м. Дно долины сильно заболочено, с большим количеством мелких провальных озер.

На основе предварительного анализа большой информации с гидрометеорологической станции Тунка за период с 1973 по 2015 годы (43 года, наиболее полный массив данных), выбраны показатели максимальной информативности:

- средние суточные, средние месячные и средние годовые значения температуры воздуха и почвогрунтов на разных глубинах;
- экстремумы температуры воздуха и температуры почвогрунтов;
- суммы положительных и отрицательных температур воздуха и почвогрунтов;
- даты перехода температуры через ноль градусов;
- высота снежного покрова;
- количество осадков.

Проведенные исследования позволили выявить особенности динамики температуры почвы за 43-летний период. На всех глубинах наблюдается тенденция к увеличению температуры, где тренды увеличиваются с глубиной (рис. 1). Также увеличивается средняя годовая температура воздуха, а в последнее десятилетие и высота снежного покрова (рис. 2).

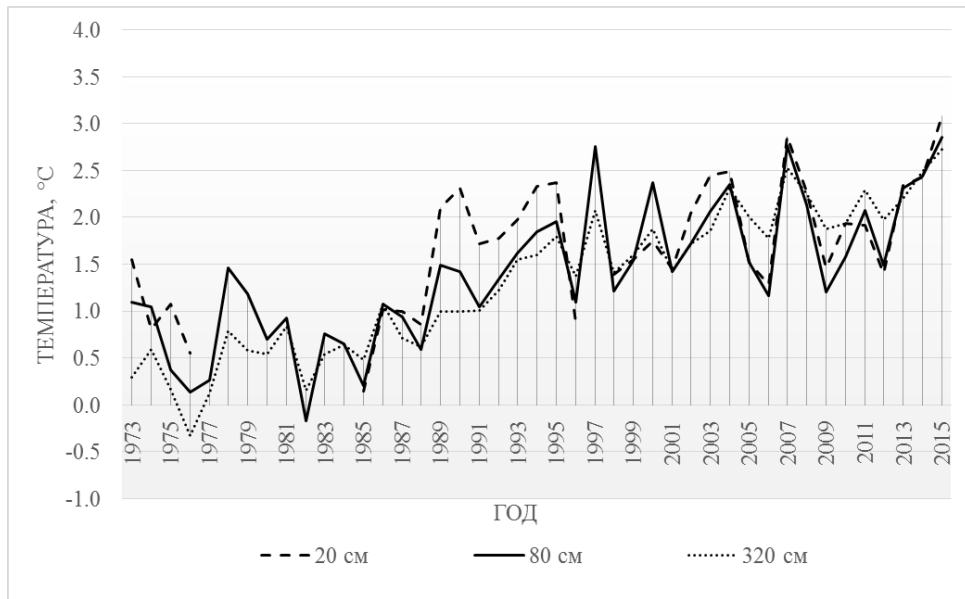


Рисунок 1. Ход средней годовой температуры почвы на разных глубинах на м/с Тунка.

Прослеживается тенденция к более быстрому росту трендов температуры почвы в приповерхностных глубинах в зимние месяцы, а на глубине в течение теплого периода (табл. 1). Это очень существенный момент для геокриологических процессов, так как ускоряются процессы деградации многолетнемерзлых пород.

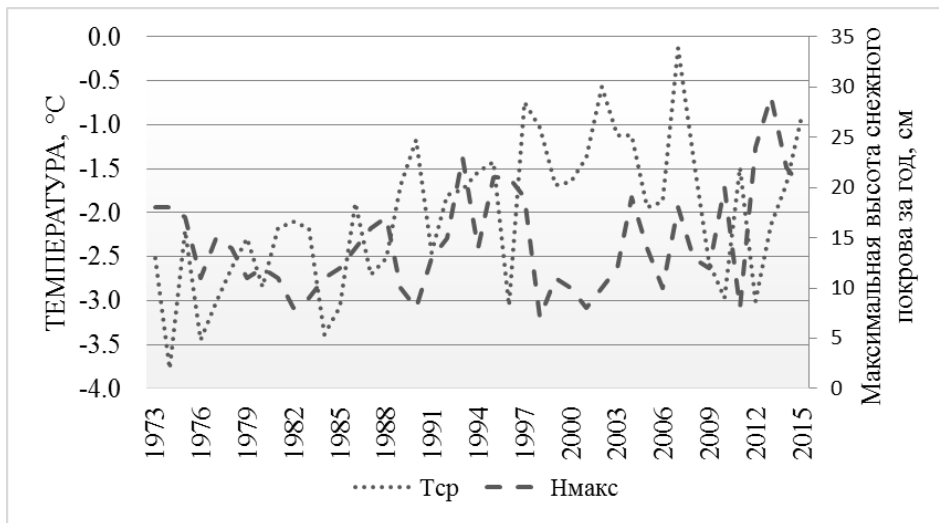


Рисунок 2. Ход средней годовой температуры воздуха и максимальной высоты снежного покрова на м/с Тунка.

Полученные результаты исследования многолетней динамики температуры почвы в Тункинской котловине в долговременной перспективе могут применяться при определении и прогнозировании климатических условий территории юга Восточной Сибири, пополняя информативную базу данных почвенно-климатических параметров. Анализ метеорологических данных и оценка вклада характеристик в температуру грунтов позволит рассмотреть вопросы потепления климата и сравнить с мониторинговыми наблюдениями, которые послужат для более детального изучения зависимостей температуры почвы от ряда факторов.

**Таблица 1. Тренды температуры воздуха, температуры почвы и атмосферных осадков по месяцам.**

Месяц	Тв воздуха, °С/10 лет	Тпочвогрунт на разных глубинах, °С/10 лет				Σ Тотр, °С/10 лет	Σ Тпол, °С/10 лет	Осадки, мм/10 лет
		20	80	160	320			
январь	0.13	<b>0.59</b>	0.46	0.67	0.63	4.05	---	-0.14
февраль	<b>0.54</b>	0.38	0.42	0.64	0.37	<b>14.83</b>	---	0.01
март	<b>0.56</b>	0.23	0.38	0.47	0.18	<b>14.22</b>	2.66	0.00
апрель	<b>0.61</b>	0.42	0.32	0.26	0.09	4.44	<b>13.77</b>	-0.50
май	0.15	-0.02	0.46	0.13	0.09	0.08	4.54	1.35
июнь	0.20	0.20	0.23	0.00	0.12	---	6.29	<b>3.40</b>
июль	<b>0.49</b>	0.39	0.49	0.10	0.31	---	<b>15.61</b>	1.87
август	0.35	0.32	<b>0.67</b>	0.58	0.97	---	<b>10.98</b>	-0.08
сентябрь	-0.01	0.34	<b>0.67</b>	<b>0.88</b>	<b>1.37</b>	-0.17	-0.16	-3.54
октябрь	<b>0.35</b>	0.34	0.56	<b>0.83</b>	<b>1.09</b>	5.35	5.37	-0.58
ноябрь	<b>0.36</b>	<b>0.61</b>	0.28	0.64	0.88	<b>10.39</b>	0.02	-0.47
декабрь	0.26	<b>0.55</b>	0.21	0.43	0.78	8.04	---	0.56
<b>ГОД</b>	<b>0.34</b>	0.36	0.44	0.50	0.57	61.98	60.40	1.61

1. Воропай, Н.Н. Мониторинг температуры почв на многолетнемерзлых породах в естественных и антропогенно-нарушенных условиях Тункинской котловины / Н.Н. Воропай, М.В. Киселев, А.А. Черкашина // Лёд и Снег. – 2019. – Т.59, №4. – С. 517-528.

2. Груза, Г.В. Обнаружение изменений климата: состояния, изменчивости и экстремальности климата / Г.В. Груза, Э.Я. Ранькова // Всемирная конференция по изменению климата (Москва, 29 сент.– 3 окт. 2003 г.): Тр. М., Паблик принт. – 2004. – С. 101–110.

3. Израэль, Ю.А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата / Ю.А. Израэль, А.В. Павлов, Ю.А. Анохин // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 1. – С. 22–34.

4. Мяч Л.Т. Изменения климатических условий и температуры грунтов в районе озера Байкал во второй половине XX и в начале XXI века / Л.Т. Мяч, Б.Г. Шерстюков // Криосфера Земли. – 2011. – т. XV, №1. – С. 80-90.

5. Павлов, А.В. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз / А.В. Павлов // Криосфера Земли. – 1997. – Т. I, № 1. – С. 47–58.

6. Павлов, А.В. Вечная мерзлота и современный климат / А.В. Павлов, Г.Ф. Гравис // Природа. – 2000. – № 4. – С. 10–18.

7. Светлаков А.А. Температурный режим многолетнемерзлых грунтов в долине реки Сенца / А.А. Светлаков, Е.А. Козырева, С.В. Алексеев // Материалы XXVII Всероссийской молодежной конференции «Строение литосферы и геодинамика». Иркутск. – 2017. – С. 209–210.

## АТМОСФЕРНО-ПОЧВЕННЫЕ ЗАСУХИ НА ТЕРРИТОРИИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

*Воропай Н.Н.<sup>1,2</sup>, Рязанова А.А.<sup>1</sup>, Гордова Ю.Е.<sup>1</sup>, Гаврилова Г.В.<sup>3</sup>*

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

<sup>2</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г.Иркутск

<sup>3</sup>Томский ЦГМС – филиал ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», г.Томск,  
voropay\_nn@mail.ru

В период современных климатических изменений особое внимание уделяется анализу комплексных гидротермических показателей, к числу которых относятся индексы засушливости, характеризующие условия тепловлагообеспеченности ландшафтов. Для расчета большинства индексов в качестве исходной информации используются значения температуры воздуха и сумм атмосферных осадков.

Однако для более корректной оценки необходимо учитывать почвенное увлажнение. В данной работе проведено сравнение результатов оценки характеристик засушливости (интенсивность, продолжительность засух) по расчетам двухкомпонентного (S-TR) и трех компонентного (S-TRE) индекса засушливости Педя за отдельные месяцы теплого периода (апрель-октябрь). Расчет проведен по формулам:

$$S(TR) = \frac{\Delta T}{\sigma T} - \frac{\Delta R}{\sigma R}, \quad S(TRE) = \frac{\Delta T}{\sigma T} - \frac{\Delta R}{\sigma R} - \frac{\Delta E}{\sigma E},$$

где  $\Delta T = T - T_{cp}$ ,  $\Delta R = R - R_{cp}$ ,  $\Delta E = E - E_{cp}$  (разность между многолетним средним месячным значением и средним значением за отдельные годы температуры воздуха, атмосферных осадков и влажности почвы в метровом слое, соответственно),  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение [1].

Полная формула отражает атмосферно-почвенную засуху, наиболее опасную для сельского хозяйства. Сокращенная – только атмосферную засуху. Значения индекса от -1 до 1 соответствуют нормальным условиям увлажнения. При  $S > 1$  наблюдаются засухи различной интенсивности, при  $S < -1$  – переувлажнение территории. Градации интенсивности явлений [2] приведены в таблице 1. Использованы многолетние ряды средних месячных значений температуры воздуха и месячных сумм атмосферных осадков (сайт Росгидромета [meteo.ru](http://meteo.ru)) и декадные значения продуктивной влажности почвы в метровом слое (Агрометеорологический ежемесячник) за период 1966-2018 гг. по трем метеостанциям Томской области – Томск, Бакчар, Первомайское.

**Таблица 1. Интенсивность явлений засухи и переувлажнения.**

засуха		норма	переувлажнение	
$1 \leq S < 2$	слабая	$-1 < S < 1$	$-2 < S \leq -1$	слабое
$2 \leq S < 3$	средняя		$-3 < S \leq -2$	среднее
$3 \leq S < 4$	сильная		$-4 < S \leq -3$	сильное
$S \geq 4$	экстрем		$S \leq -4$	экстрем

В современных научных публикациях в основном анализируются только атмосферные засухи, и при этом говорится об их влиянии на растительность, ее продуктивность, урожайность и др. Это не совсем корректно, так как для растений почвенное увлажнение важнее, чем атмосферное. Применение такого показателя, как индекс засушливости Педя, позволил установить взаимосвязь между этими видами засушливости. Отмечается

синхронность изменений индексов, о чем свидетельствуют высокие значения коэффициентов корреляции (0,88-0,92). Далее показано сравнение индексов на примере агрометеостанции Томск. В таблице 2 приведено количество случаев засухи/периодов переувлажнения, наблюдавшихся за 1966-2018 гг. в различные месяцы вегетационного периода в районе Томска.

**Таблица 2. Сводная таблица по количеству явлений разной интенсивности**

		Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.
Количество лет		7	49	49	49	44	31	31
Засухи	атмосферно-почвенных (всего)	3	15	15	18	12	12	13
	слабых	-	5	5	9	2	8	6
	средних	3	3	5	5	7	2	6
	сильных	-	2	2	2	3	1	-
	экстрем	-	3	3	2	-	1	1
	атмосферных (всего)	3	14	13	14	12	9	11
	слабых	2	9	6	8	10	8	6
	средних	1	3	6	4	1	-	4
	сильных	-	2	1	2	1	1	1
	экстрем	-	-	-	-	-	-	-
Период переувл.	атмосферно-почвенных (всего)	1	14	17	14	15	10	11
	слабых	1	7	8	7	7	5	4
	средних	-	2	5	3	5	3	5
	сильных	-	2	3	2	3	1	2
	экстрем	-	3	1	2	-	1	-
	атмосферных (всего)	-	14	13	13	11	8	9
	слабых	-	7	7	9	3	5	8
	средних	-	5	4	3	6	2	-
	сильных	-	2	2	-	2	1	1
	экстрем	-	-	-	1	-	-	-
Норма	атмосферно-почвенных	3	20	17	17	17	9	7
	атмосферных	4	21	23	22	21	14	11

При расчете индекса только по значениям температуры и осадков, выявлен лишь один случай экстремальной интенсивности (переувлажнение –  $S < -4$ ). Тогда как при расчете атмосферно-почвенных явлений определено 10 месяцев с экстремальной засухой и 7 с экстремальным переувлажнением. Таблица 3 показывает количество совпадений засух и периодов переувлажнения, полученных при расчете трехкомпонентного и двухкомпонентного индексов засушливости Педя по данным агрометеостанции Томск.

**Таблица 3. Сводная таблица по количеству совпадений явлений разной интенсивности.**

	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Совпадение явления засуха	3	12	12	13	11	8	11
Слабых	-	4	3	5	1	5	2
Средних	1	2	3	2	1	-	3
Сильных	-	-	-	1	1	-	-
Экстремальных	-	-	-	-	-	-	-
По интенсивности всего	1	6	6	8	3	5	5
Совпадение периодов переувлажнения	-	11	13	9	10	7	9
Слабых	-	3	3	3	3	2	3
Средних	-	-	2	1	3	1	-
Сильных	-	-	1	-	1	-	-
Экстрем	-	-	-	1	-	-	-
По интенсивности всего	-	3	6	5	7	3	3
Совпадение нормы	3	15	16	12	15	7	7

Что касается показателей, характеризующих нормальные условия, то по атмосферным явлениям наблюдается более благоприятная обстановка – в каждом месяце количество показателей нормы больше, чем по атмосферно-почвенным индексам.

Анализ режима атмосферно-почвенных явлений, позволил выявить годы, в которых по три и более месяца подряд фиксировались аномальные засухи – их оказалось 11 за весь рассматриваемый период (1966 – 2018 гг.), т.е. примерно 1 раз каждые 5 лет. При этом лет с аномальным переувлажнением было всего 5, т.е. в два раза меньше.

Исследование было поддержано Министерством науки и высшего образования РФ (госзадание ИМКЭС СО РАН, рег.номер проекта 121031300158-9).

1. Педь Д.А. О показателе засухи и избыточном увлажнении – Труды Гидрометцентра СССР, 1975, вып. 156, С.19-38.

2. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016: Handbook of Drought Indicators and Indices (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva.



## **ХАРАКТЕРИСТИКИ КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКОВ ВО ВРЕМЯ ФОРМИРОВАНИЯ МОЛНИЙ И ГРАДА НАД ЗАПАДНОЙ СИБИРЬЮ**

*Горбатенко В.П., Яськов А.А.*

Томский государственный университет, vpgor@tpu.ru

Для улучшения качества прогноза грозы и града на территориях с редкой сетью метеорологических и радиолокационных наблюдений за характеристиками атмосферы, наиболее перспективными являются результаты наблюдений за параметрами конвективной облачности с космических аппаратов. Измерения параметров облачности и наличие пороговых значений ряда характеристик, позволяющих идентифицировать степень развития конвективных ячеек, позволит улучшить прогноз места локализации и времени образования ливневых осадков, града и гроз.

Территория Западной Сибири расположена вблизи одного из очагов наибольшей скорости потепления [1]. Увеличивается продолжительность тёплого периода, что вызывает увеличение и продолжительности грозового сезона и увеличение количества опасных конвективных явлений в течение такого сезона. Поэтому определение особенностей строения грозовой и градовой облачности над такими географическими регионами является актуальнейшей задачей.

Поскольку на фоне потепления климата, молниевая активность и частота выпадения града над Западной Сибирью в последнее десятилетие увеличивается [2, 3], качественный прогноз временной и пространственной локализации этих явлений становится все актуальнее. Заметим, что продукты оперативного спутникового мониторинга облачности становятся все более востребованными для повышения качества в оперативной практике прогноза погоды [4].

Целью настоящей работы является определение характеристик конвективной облачности, продуцирующей такие атмосферные явления как грозы и град, по спутниковым данным данные КА Terra и Aqua, оснащенных радиометрами MODIS в период с 2015-2022 гг.

Для анализа характеристик конвективной облачности использовались спутниковые данные КА Terra и Aqua. Проведено сравнение продуктов MODIS, содержащих характеристики конвективной облачности при наличии в них гроз и града с пространственными разрешениями 1км.

Области применения данных дистанционного зондирования спутников Aqua и Terra сконцентрированы на изучении облачного покрова, концентрации взвешенных частиц (аэрозолей), распределения водяного пара в атмосфере, мониторинге опасных атмосферных явлений. Для получения точных характеристик конвективной облачности, в которой формируются грозы и град необходимо актуально выбирать случаи с как можно более точным временным и пространственным совпадением данных дистанционного зондирования и наземных регистраций. Главной проблемой такого выбора является кратковременность формирования гроз и града в конвективных облачных системах, что налагает определенные сложности в нахождении одновременных съемок космическим аппаратом и регистрацией наземными средствами наблюдений. Например, продолжительность выпадения града составляет около 5 минут, поэтому высока вероятность того, что данные, полученные с космических аппаратов редко соответствуют времени, когда облако было градоопасным. Трудно найти даже случаи с учетом различия во времени спутниковой съемки параметров облачности и зарегистрированного на метеорологических станциях времени начала явления менее 10 минут.

Для составления выборки случаев с грозой и градом использовались данные Западно-Сибирского УГМС и Томского ЦГМС. Для решения поставленных задач за исследуемый период для качественного анализа физических характеристик облачности удалось выбрать 50 случаев с молниевой активностью и 35 случаев регистрации молний в совокупности с выпадением града. Все анализируемые случаи фиксировались в пределах территории Западной Сибири с координатами 52-60° с.ш. и 72-88° в.д.

Задачами настоящего исследования было выявление характеристик конвективной облачности, в которой образуются грозы и град и выявление различий в характеристиках грозовых и градовых облаках.

Для анализа характеристик облачности из файлов были выбраны следующие характеристики:

- 1) Высота верхней границы облачности (ВГО).
- 2) Водозапас – это количество осаждаемой воды из облака на единичную поверхность, или содержание жидкой воды и льда в вертикальном столбе единичного сечения от основания до вершины облака.
- 3) Оптическая плотность облачного слоя – интегральная величина, характеризующая ослабление прямой солнечной радиации на пути сквозь облачный слой.
- 4) Эффективный радиус облачных частиц – средневзвешенное среднее значение от распределения по значениям радиусов облачных частиц, или радиус облачных частиц, в наибольшей степени отвечающий за микрофизические свойства облака и дающий максимальный вклад в его водность.

Наличие таких различий обусловлено физическими процессами в конвективных облачных системах. Например, в работе [5] было определено, что высокую вероятность формирования грозы и выпадения града обеспечивают типы конвективной облачности с высокими значениями водности ( $>1$  г/м<sup>3</sup> – для градовой облачности и  $>0,5$  г/м<sup>3</sup> – для грозовой).

Также в работе [5] было выявлено, что водность облаков с градом существенно выше, чем конвективных облаков с ливнями и грозами. Это связано с наличием более мощного облачного слоя с интенсивными восходящими движениями, благодаря чему формируются облачные элементы в виде градин диаметром до 30 мм. Согласно расчетным данным [6], среднее значение водозапаса для конвективных ячеек без осадков составило 0,23 кг/м<sup>2</sup>, с ливнями – 0,48 кг/м<sup>2</sup>, с грозами – 2,86 кг/м<sup>2</sup> и с градом – 16,3 кг/м<sup>2</sup>.

Известно, что водозапас облачности при грозе с градом по данным МРЛ [7] также во много раз превосходит значения водозапаса в грозовой облачности без града, в то время как по полученным в настоящем исследовании спутниковым данным КА Terra и Aqua отличия оказались не существенны. Возможно необходима корректировка регистрации водозапаса, определяемого системой MODIS. Другой причиной отсутствия различий является, возможно, тот факт, что ВГО над исследуемой территорией часто может быть размыта, и из-за это не соответствует уровню максимальной водности, тем более что мощные конвективные системы часто имеют несколько максимумов водности в толще [8].

В каждой из приведенных выше работ при сравнении водозапасов конвективной облачности при формировании в них только молний гроз и молний с градом были найдены различия между значениями водности, однако в результате исследований спутниковых данных КА Terra и Aqua таких различий обнаружить не удалось (таблица 1).

В результате проведенных исследований не удалось по данным КА Terra и Aqua найти статистически достоверные отличия грозовой облачности с градом от грозовой облачности без града. Актуальным для выделения пороговых значений характеристик грозовой и градовой облачности является, по видимому, увеличение объема аналогичных исследований для каждого месяца грозового сезона.

**Таблица 1. Статистические характеристики параметров конвективной облачности по спутниковым данным с разрешением 1 км.**

Случаи гроз без града				
Характеристика облачности	Статистические характеристики			
	Среднее	Макс. / Мин.	Медиана	Станд. откл.
Высота ВГО, м	10170	16950/6000	9750	268
Водозапас облака, г/м <sup>2</sup>	3301	4986/1726	3191	91
Оптическая плотность	99,6	100/77	100	0,4
Эффективный радиус частиц, мкм	36,5	54,0/18,7	36,2	0,97
Случаи гроз с градом				
Высота ВГО, м	8912,9	14350/6000	8850	303,6
Водозапас облака, г/м <sup>2</sup>	3579,8	5409/2021	3429	141,01
Оптическая плотность	100	100/100	100	0
Эффективный радиус частиц, мкм	39,2	58,6/25,2	37,29	1,56

Актуальность проводить сравнение грозовой и градовой облачности отдельно для каждого месяца, заключается в том, что различия в ряде таких характеристик как высота ВГО и температура на верхней границе конвективной ячейки могут существенно различаться. Например, в рамках настоящих исследований обнаружено, что наибольшие высоты ВГО зарегистрированы в районе метеорологических станций Колпашево и Ванжиль-Кынак в июле и в первой декаде августа, а град чаще регистрировался в июне (49% от анализируемых случаев). Это, несомненно, повлияло на результат поиска различий в параметрах грозовой и градовой облачности. Тем не менее установлено, что детектирование кучево-дождевой облачности с вероятностью развития в ней гроз и града с помощью продуктов MODIS возможно. Например, получено, что по прибору MODIS значения водозаписа кучево-дождевой облачности при формировании в ней таких явлений как гроза и град, составляет в среднем  $\sim 3400$  г/м<sup>2</sup>.

Выявлены и положительные результаты сравнения ряда характеристик облачности над Западной Сибирью полученных с КА Terra и Aqua и другими методами регистрации:

1) Анализ работ [6, 9], в которых представлены такие характеристики конвективной облачности во время грозы и града как значения высоты верхней границы облачности (ВГО) и эффективного радиуса частиц, формирующих облака, вполне соответствуют характеристикам, полученным с КА Terra и Aqua.

2) Высота ВГО грозовой облачности без града в среднем составила 10200 м, грозовой облачности с градом около 9000 м. Причиной тому могут быть различия в частоте регистрации анализируемых явлений в разные месяцы. Тем не менее, полученные результаты согласуются с результатами регистрации ВГО аэрологическими и радиолокационными методами в дни наличия опасных конвективных явлений [2, 6, 9].

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать заключение, что использование данных КА Terra и Aqua возможно для детектирования грозовой облачности и облачности с грозой и градом, если для анализируемой территории определены пороговые значения ряда характеристик по данным аэрологического зондирования или ДМРЛ.

Для детектирования потенциально опасной облачности, которая может дать град необходимо использовать данные геостационарных спутников с высокой частотой снимков (от 5 до 15 мин), что позволит отмечать развитие конвективных явлений и мощности облачных образований.

1. Региональный мониторинг атмосферы / М. Ф. Адаменко, Н. В. Алехина, В. П. Горбатенко [и др.]; Сибирское отделение Российской Академии наук; Научно-техническая программа "Сибирь", Проект "Климато-экологический мониторинг Сибири". Том Часть 4. – Томск: Издательство "РАСКО", 2000. – 270 с.

2. Горбатенко В.П. Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири / Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В., Константинова Д.А. // Метеорология и гидрология. — 2020. — № 5. — С. 108-117.

3. Опасные конвективные явления над Западной Сибирью в XXI веке / В. П. Горбатенко, К. Н. Пустовалов, А. В. Громова, П. М. Нагорский // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: доклады конференции, Нальчик, 08–10 сентября 2021 года. – Нальчик: Издательство "Принт Центр", 2021.

4. Волкова, Е. В. Мониторинг характеристик облачного покрова и осадков по данным полярно-орбитальных и геостационарных спутников / Е. В. Волкова, А. И. Андреев, А. А. Косторная // Метеорология и гидрология. – 2021. – № 12. – С. 45-56.

5. Волкова Е. В. Оценки параметров облачного покрова по данным радиометра AVHRR ИСЗ NOAA регионального покрытия в светлое время суток в автоматическом режиме / Е. В. Волкова, А. Б. Успенский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2007. – С. 62–73.

6. Калинин Н. А. Методика расчета водности и водозапаса кучево-дождевой облачности / Н. А. Калинин, А. А. Смирнова // Вестник удмуртского университета. – 2008. – №1. – С. 59–71.

7. Косторная А. А. Определения влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков по данным российских метеорологических спутников: дис. физ. наук канд. физ.-мат. наук / А. А. Косторная. – М., 2021. – 137 с.

8. Волкова Е. В. Определение параметров облачного покрова и осадков по данным МСУ-МР с полярно-орбитального метеоспутника «Метеор-М» №2 для территории Западной Сибири / Е. В. Волкова, Д. Б. Гиричев // Сборник тезисов Шестнадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". — Москва, ИКИ РАН, 12-16 ноября 2018 г. — С. 166.

9. Ананова, Л. Г. Особенности радиолокационных характеристик конвективной облачности при шквалах на юго-востоке Западной Сибири / Л. Г. Ананова, В. П. Горбатенко, И. А. Луковская // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 7. – С. 51-56.

## РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ НАД ЮГОМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ИХ СВЯЗЬ С ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ И ОСАДКОВ

Гришаев М.В.<sup>1</sup>, Пустовалов К.Н.<sup>1,2</sup>, Горбатенко В.П.<sup>1</sup>, Нагорский П.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск  
mishagrishaev@gmail.com, const.pv@yandex.ru, vpgor@tpu.ru, npm\_sta@mail.ru

Одним из последствий изменения климата является изменение повторяемости кучево-дождевой облачности и связанных с ней опасных явлений [1, 2]. Наиболее опасными проявлениями конвективной облачности являются мезомасштабные конвективные системы (МКС), включая их разновидность – мезомасштабные конвективные комплексы (МКК) [2]. Мезомасштабные конвективные системы представляют собой организованные скопления (масштаба мезо- $\alpha$ ) мощных кучево-дождевых облаков (*Cb*), имеющие единую вершину («наковальню») в зрелой и поздней стадии развития. С МКС связаны многие неблагоприятные и опасные явления погоды, часто причиняющие значительный экономический ущерб и нередко уносящие человеческие жизни (грозы, смерчи, шквалы, микропорывы, град, интенсивные ливни и др.) [3–5]. На территории юга Западной Сибири отмечается повышенная повторяемость МКС [6]. Ранее были получены оценки характеристик МКС над территорией юга Западной Сибири по данным полярно-орбитальных спутников (Terra, Aqua, CloudSat и CALISTO) [7]. Однако, радиолокационные характеристики МКС по данным наземных радаров для данного региона, их изменение в жизненном цикле МКС и взаимосвязь с сопутствующими явлениями остаются слабо изученными. В связи с вышесказанным, цель данного исследования – оценка радиолокационных характеристик МКС на юге Западной Сибири по данным ДМРЛ-С, а также их пространственно-временной изменчивости и связи с интенсивностью осадков и грозовой активностью.

Для достижения поставленной цели были отобраны случаи прохождения МКС над территорией юга Западной Сибири в теплый период 2021 г., для которого имелись в наличии данные ДМРЛ-С, зарегистрированные в аэропорту Толмачёво (г. Новосибирск). Производилось дешифрирование МКС на спутниковых изображениях [<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>; <https://meteologix.com/>]. Отбирались организованные скопления кучево-дождевых облаков, объединённые общей вершиной (наковальней) и имеющие следующие характеристики: оптическая плотность облаков 23 и более, температура на верхней границе облаков  $-32$  °С и ниже, горизонтальный размер наковальни – 50 км и более. Всего отобрано 12 случаев МКС.

Далее для отобранных случаев прохождения МКС над территорией исследования выбирались данные ДМРЛ-С в формате LNR (\*.lgr). Затем производилась визуализация (шаг по времени 30 мин) рассчитанных по данным ДМРЛ-С радиолокационных характеристик облачности и осадков с помощью специализированного ПО ВОИ ДМРЛ-С «ГИМЕТ-2010», а также извлечение изображений пространственной изменчивости характеристик МКС из рабочей области «ГИМЕТ-2010», их оцифровка (разложение изображения на значения каналов R, G и B в каждом пикселе) и экспорт полученных данных в формате MAT (\*.mat) с помощью разработанного авторами приложения на языке MATLAB (MathWorks, Inc.).

Наследующем этапе проводилась пакетная обработка содержащихся в MAT-файлах данных, которая включала раскодирование RGB кода, географическую привязку каждого пикселя, объединение данных пространственной изменчивости характеристик

МКС за последовательные моменты времени (с шагом 30 мин) в виде 3D-матриц, статистический анализ изменчивости характеристик МКС, а также создание тематических изображений, иллюстрирующих их пространственно-временные изменения (пример представлен на рис. 1).

Для анализа грозовой активности, сопутствующей МКС, дополнительно привлекались данные локализации разрядов молний, зарегистрированных сетью World Wide Lightning Location Network (WWLLN). Оперативные данные WWLLN (с задержкой 6 ч) выкладываются в открытом доступе на сайте [<http://wwlln.com>] в формате KMZ. Для обработки и визуализации данных WWLLN использовался программный код, описанный в работе [8].

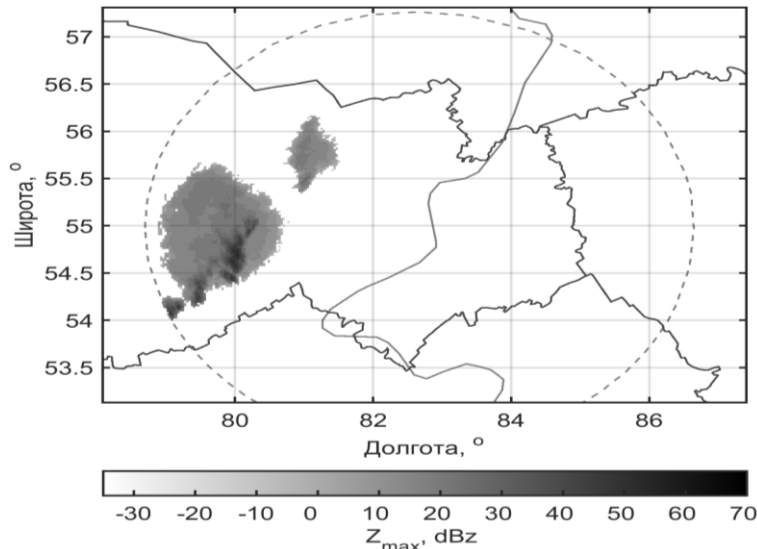


Рисунок 1. Пространственная изменчивость максимальной радиолокационной отражаемости в МКС (05.07.2021 г., 3:30 местного времени). Пунктирная кривая ограничивает зону обзора ДМРЛ-С в аэропорту Толмачёво.

В табл. 1 приведены статистические характеристики изменчивости (как пространственной, так и временной) некоторых характеристик МКС, полученных по данным ДМРЛ-С: максимальной радиолокационной отражаемости ( $Z_{\max}$ ), интегральной водности ( $Q$ ), высоты верхней границы облачности ( $H_{\text{ВГО}}$ ) и интенсивности осадков ( $I_p$ ) в МКС. Согласно этой таблице, среднее значение максимальной радиолокационной отражаемости в исследованных случаях МКС ( $Z_{\max}$ ) равно  $\sim 16$  dBZ, а её типичный диапазон изменения (от  $P_{25}$  до  $P_{75}$ ) –  $10 \div 22$  dBZ. Относительно невысокие среднее и типичные значения  $Z_{\max}$ , рассчитанные для МКС в целом объясняются доминированием модальных значений  $Z_{\max}$  (около 16 dBZ), связанными с областями слоистообразной облачности в МКС [3], площадь которых в стадии зрелости и диссипации значительно превышает площадь конвективной области МКС (рис. 1). Распределение  $Z_{\max}$  является асимметричным и имеет «тяжёлый» хвост. Значения  $Z_{\max}$  в пределах верхнего квартиля (75-перцентиль и более), наблюдающиеся, главным образом, в конвективной области МКС, где формируются ливни, грозы и град, составляют  $21 \div 53$  dBZ.

Аналогичным образом ведут себя другие проанализированные характеристики МКС. Интегральная водность облачности МКС в среднем равна  $0,7$  кг/м<sup>2</sup> и, как правило, изменяется в диапазоне  $0,2$  до  $0,7$  кг/м<sup>2</sup>, а её значения в пределах верхнего квартиля составляют  $1 \div 19$  кг/м<sup>2</sup>. Высота верхней границы облачности МКС в среднем равна  $7$  км и, обычно, изменяется в диапазоне  $6$ – $8$  км, а её значения в пределах верхнего квартиля –  $8 \div 13$  км. Интенсивность осадков, выпадающих из МКС, в среднем равна  $1,6$  мм/ч и,

обычно, изменяется в диапазоне  $0,1 \div 1,4$  мм/ч, а её значения в пределах верхнего квартиля –  $7 \div 73$  мм/ч.

**Таблица 1. Средние по всем случаям значения статистических характеристик  $Z_{\max}$ ,  $Q$ ,  $H_{\text{ВГО}}$  и  $I_p$  в МКС, рассчитанные на основе их значений по всей площади МКС и в течении всего периода их существования.**

	$Z_{\max}$ , dBZ	$Q$ , кг/м <sup>2</sup>	$H_{\text{ВГО}}$ , км	$I_p$ , мм/ч
Среднее	16,1	0,7	7	1,6
Мода	15,9	0,2	7,3	0,4
25-перцентиль	10,1	0,2	5,9	0,14
75-перцентиль	21,6	0,7	8,3	1,4
95-перцентиль	31,4	2,6	9,6	7,3
Максимум	52,5	18,7	13,2	73,3

В динамике радиолокационных характеристик МКС прослеживаются стадии их жизненного цикла: развития, зрелости и диссипации. В табл. 2 приведены основные характеристики жизненного цикла рассмотренных случаев МКС. Согласно табл. 2, длительность стадии развития в среднем составила 2,2 ч. При этом её минимальная длительность равна 0,5 ч, а максимальная – 4 ч. Длительность стадии зрелости также в среднем была равна 2,2 ч, а её максимальное и минимальное значения – 4 ч и 1 ч, соответственно. Стадия диссипации в среднем длилась 2,8 ч. Максимальная длительность этой стадии составила 5 ч, а минимальная – 0,5 ч. В большинстве рассмотренных случаев стадия диссипации являлась наиболее длительной среди всех стадий развития МКС. Общая длительность существования МКС в среднем составляла ~7 ч. Наибольшая длительность существования МКС составила 11 ч, а наименьшая – 3,5 ч. Максимальные значения радиолокационных характеристик МКС, чаще всего, отмечались вечером (18–21 ч местного времени). Однако, также были зарегистрированы случаи МКС с ночным и утренним максимумом развития МКС.

**Таблица 2. Длительность стадий жизненного цикла и общая длительность существования МКС.**

	Длительность стадий развития МКС, ч			Общая длительность существования МКС, ч
	развития	зрелости	диссипации	
Средняя	2,2	2,2	2,8	7,2
Минимальная	0,5	1	0,5	3,5
Максимальная	4,0	4	5,0	11

По данным ДМРЛ-С во всех рассмотренных случаях в течении жизненного цикла МКС отмечалась гроза и сильный ливневой дождь. Кроме того, в 75 % случаев регистрировался град. Заметим, что данные явления наблюдались, главным образом, над конвективной частью МКС (в одном или нескольких пикселях), для которой  $Z_{\max} > 20$  dBZ, а также, преимущественно, на стадии зрелости МКС. Факт наличия грозы во всех случаях МКС подтверждается данными WWLLN. Так, в среднем в МКС было зарегистрировано 642 разрядов молний (максимум – около 3000 разрядов).

В большинстве рассмотренных случаев отмечалось качественное согласие между изменением в жизненном цикле средних (по всей площади) значений  $Z_{\max}$  в МКС, изменением средней интенсивности осадков и грозовой активности (по данным WWLLN). Максимальная интенсивность осадков и максимальное количество разрядов молний за 30 мин ( $N$ ), как правило, отмечались при максимальных  $Z_{\max}$  в МКС. Пример подобных изменений представлен на рис. 2.

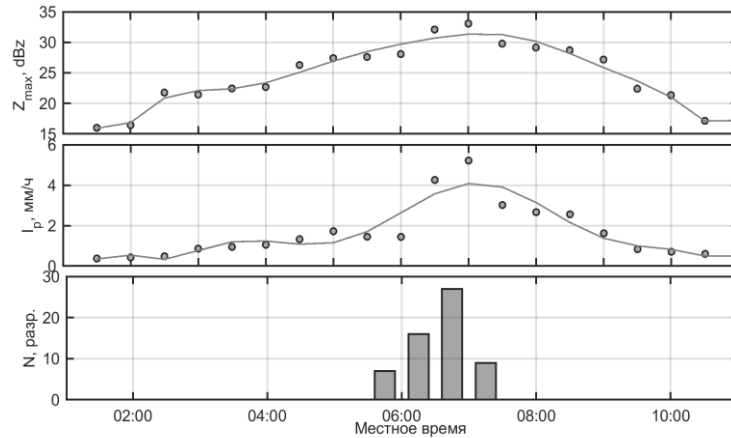


Рисунок 2. Пример изменения средних значений (по всей площади МКС)  $Z_{\max}$  и  $I_p$ , а также  $N$  для случая прохождения МКС 14.06.2021 г.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены радиолокационные характеристики структуры МКС, формирующихся над Западной Сибирью и обеспечивающих ливневые осадки, грозы и град. Конвективные ячейки в МКС, в которых образуются сильные ливневые дожди, грозы и град, могут быть выявлены при значениях  $Z_{\max} > 22$  dBZ,  $Q > 1$  кг/м<sup>2</sup> и  $H_{\text{ВГО}} > 8$  км.

Полученные результаты помогут улучшить прогноз времени и места локализации таких явлений, что крайне актуально.

1. Chernokulsky A.V., Eliseev A.V., Kozlov F.A., et al. Atmospheric Severe Convective Events in Russia: Changes Observed from Different Data // Russian Meteorology and Hydrology. 2022. V. 47, № 5. P. 343–354.

2. Gorbatenko V.P., Kuzhevskaya I.V., Pustovalov K.N., Chursin V.V., Konstantinova D.A. Assessment of Atmospheric Convective Potential Variability in Western Siberia in Changing Climate // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. V. 45, № 5. P. 360–367.

3. Вельтищев Н.Ф., Степаненко В.М. Мезометеорологические процессы: Учебное пособие. Москва: Изд-во МГУ. 2016. 101 с.

4. Houze R.A. Mesoscale convective systems // Rev. Geophys. 2004. V. 42, P. RG4003.

5. Абулаев С.М., Желнин А.А., Ленская О.Ю. Структура мезомасштабных конвективных систем в Центральной России // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 20–32.

6. 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 south-east of Western Siberia // Geosphere research (Геосферные исследования). 2021. № 3. P. 115–124.3. P. 115–124.

7. Nagorskiy P.M., Zhukov D.F., Kartavykh M.S., Oglezneva M.V., Pustovalov K.N., Smirnov S.V. Properties and Structure of Mesoscale Convective Systems over Western Siberia According to Remote Observations // Russian Meteorology and Hydrology. 2022. V. 47, № 12. P. 938–945.

8. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Пустовалов К.Н., Громова А.В. Грозовая активность над Западной Сибирью // Geosphere research (Геосферные исследования). 2022. № 4. С. 123–134.



## ДОЖДЛИВЫЕ ПЕРИОДЫ В ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

*Кижнер Л.И.<sup>1</sup>, Масленникова Э.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет, kdm@mail.tsu.ru

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
frenki00dji@mail.ru

Условия увлажнения – важнейший показатель глобального и регионального климата [1] – по влиянию на природные объекты (экосистемы, поверхностные и подземные воды, моря и др.) и отрасли экономики (сельское, лесное, водное хозяйство, строительство, транспорт, ТЭК и др.).

Поэтому изучение режима выпадения осадков, включая периоды продолжительных осадков, в разных регионах, и изменение его в течение длительного периода является актуальным. Особенно это важно на фоне наблюдающегося изменения климата, которое повышает социально-экономические риски региона [2].

Целью данного исследования является рассмотрение периодов с осадками различной непрерывной продолжительности на станциях Томской области.

Полученные результаты имеют практическую значимость для оценки потенциального ущерба, который может быть нанесен различным отраслям экономики (сельскому хозяйству, лесному хозяйству, строительству и т.д.) в случае продолжительных дождей. Они могут быть использованы для разработки мер по уменьшению рисков и защите экономических интересов региона.

Продолжительные осадки можно отнести к экстремальным.

Длительные периоды с осадками могут вызвать негативные гидрологические явления, проблемы в лесном комплексе (нарушается водный баланс леса), земледелии. Как избыточное, так и недостаточное увлажнение может иметь и положительные, и отрицательные последствия. Избыточное увлажнение является фактором, усиливающим многие неблагоприятные процессы в почвах: заболачивание, водная эрозия, смыв почв и образование оврагов, оголение почв гумидной зоны, деградация почв лесной зоны и другие последствия. В сельском хозяйстве длительная дождливая погода приводит к потерям урожая, снижению качества зерна, росту числа насекомых и вредителей, сдерживает темпы уборочных работ, что приводит к снижению экономических показателей сельхозпроизводителей на 15-20%. Высокие температуры и влажность провоцируют резкий рост заболеваний растений, что увеличивает затраты на средства защиты, что также влияет на себестоимость сельхозпродукции. Экстремальные осадки длительной продолжительности могут наносить катастрофический ущерб сельскому хозяйству и неблагоприятно воздействовать, при избыточном переувлажнении, на продуктивность сельскохозяйственных культур.

Случай продолжительных осадков наблюдался в Томской области 15-21 октября 2021 г. В Томском районе был введен режим ЧС муниципального характера из-за гибели урожая из-за неблагоприятной погоды. Было потеряно около 30% картофеля, 50% свеклы [3].

Для уменьшения потерь необходимо корректировать и внедрять новые технологий работы, использовать севооборот, расширять средства защиты растений и удобрений.

В работе использовались данные по осадкам для 9 метеорологических станций Томской области, равномерно расположенных по территории, за период с 1977 по 2015 гг. [4]. Была рассчитана повторяемость (число случаев) дождливых периодов разной непрерывной продолжительности. Продолжительность периодов выбрана с интервалом в 2 дня. При этом выбирались периоды продолжительностью 1-2, 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12,

13-14, 15-16 дней и рассчитывалось число случаев за весь теплый период года (по месяцам с апреля по октябрь).

Получено, что повторяемость периодов с осадками обратно пропорциональна их продолжительности. Наиболее часто осадки продолжаются 1–2 дня (для разных станций 63-72 % от всех периодов), а длительные осадки (7 суток и более) – явление очень редкое. Повторяемость таких длительных дождливых периодов составляет от 3,9 % (Новый Васюган) до 7 % (Тегульдет). Самая большая непрерывная продолжительность осадков составила на станции Тегульдет (восточная часть области, 21 день). Длительные периоды (15-21 день) отмечались чаще всего в июле и октябре. Распределение повторяемости дождливых периодов разной продолжительностью удовлетворительно описывается экспоненциальной зависимостью. При этом, несмотря на высокий коэффициент детерминации, эта зависимость дает заниженные значения (количество случаев) для самого короткого периода – 1-2 дня (примерно на 10%).

В таблице 1 дано распределение числа случаев разных по продолжительности периодов с осадками для двух станций.

**Таблица 1. Повторяемость (число случаев) непрерывных периодов с осадками**

Месяц	Продолжительность периодов, число дней									Макс.прод/ число случаев
	1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-21	
	Колпашево									
Апрель	164	43	0	0	0	1	0	0	0	
Май	157	46	15	5	2	0	0	0	0	
Июнь	157	39	20	1	1	0	1	0	0	
Июль	123	44	14	6	1	0	0	1	0	15/1
Август	132	49	22	9	2	2	0	0	0	
Сентябрь	127	49	21	12	1	0	0	0	0	
Октябрь	106	48	21	8	1	3	1	0	0	
Общее чи	966	318	113	41	8	6	2	1	0	
	Томск									
Апрель	153	47	9	4	2	0	0	0	0	
Май	147	44	18	4	0	0	1	0	0	
Июнь	161	49	11	5	1	0	0	0	0	
Июль	165	38	12	6	1	1	0	0	0	
Август	137	45	18	9	2	1	0	0	0	
Сентябрь	133	42	19	9	4	0	0	0	0	
Октябрь	106	38	19	5	6	3	0	2	0	15/2
Общее чи	1002	303	106	42	16	5	1	2	0	

Получено, что в целом продолжительность периодов определенной длительности распределено приблизительно равномерно во все месяцы теплого времени года. Различие по территории (по разным станциям) также несущественно и не превышает 5 %.

Были рассмотрены экстремальные осадки по продолжительности (7 и более дней), являющиеся наиболее опасными и наносящими социальный и экономический ущерб.

На большей части территории наблюдается синхронное распределение количества длительных периодов с осадками. Ежегодно за вегетационный период фиксируется от 1 до 6 длительных периодов с осадками. По количеству таких периодов отличается 2007 год, когда на большинстве станций было отмечено повышенное их количество.

Наиболее часто длительные периоды с осадками (10 и более дней) наблюдались на станции Александровское (север области), максимальная продолжительность составила 20 дней.

Получено, что длительные периоды с осадками встречаются нечасто, так как для этого необходимо сочетание определенных синоптических условий, при которых на территории длительное время господствует циклоническое поле и серии волн на фронтах. На территории Томской области, с присущими ей физико-географическими условиями, данные между станциями не сильно разнятся.

Анализ изменения во времени числа случаев длительных периодов с осадками (7 и более дней) показал, что статистически значимое увеличение числа случаев с такими осадками со временем зафиксировано только на станции Прохоркино (северная часть области). На остальных станциях рост числа случаев длительных периодов с осадками не является статистически значимым.

В работе была выполнена осредненная оценка влияния длительных дождливых периодов на сельское хозяйство области.

Как уже указывалось, длительные дождливые периоды существенно усложняют работу аграриев по производству сельскохозяйственной продукции. Это касается и этапов роста, развития растений, и уборки урожая.

В работе рассмотрены производство пшеницы (озимой и яровой) и выращивание картофеля, так как эти две составляющие являются преобладающими в растениеводстве Томской области.

Ниже (таблица 2) представлен список мероприятий, которые отражают стоимость защитных мер для уменьшения потерь (в наших обозначениях С), а также возможные убытки от длительных дождей (L).

**Таблица 2. Защитные меры и убытки, которые могут быть вызваны длительными дождями**

№№	С	L
11.	Установка «умных» метеостанций, позволяющих принимать оперативные и технологические решения в зависимости от фактической и будущей погоды	Потери урожая за счет полегания зерновых при длительных дождях
22.	Корректировка и внедрение новых технологий	Деградация почв
33.	Изменения в севообороте	Ухудшение качества урожая – снижение его товарной стоимости
4.	Увеличение списка средств защиты от вредителей и удобрений	Потери урожая за счет невозможности его убрать из-за длительных осадков до 15-20 %, картофеля до 30% и более
55.	Использование современной техники	Потери урожая за счет болезней картофеля при нахождении его в переувлажненной почве
66.	Инвестиции на охрану и рациональное использование земель и другие мероприятия (примерно 200 млн руб).	Дополнительные потери за счет сушки переувлажненного зерна, картофеля
77.	Затраты на то, чтобы перенаправлять уборочные машины с одного хозяйства на другое для уборки урожая в кратчайшие сроки	Потери урожая за счет сдерживания темпа уборочных работ
88.	Затраты на то, чтобы мобилизовать людей для своевременной уборки урожая, и другие дополнительные мероприятия	Потери урожая за счет длительных дождей, наблюдавшихся в любой из периодов вегетации

На основе различных данных, взятых из открытых источников [5-7], касающихся объемов производства пшеницы и картофеля в Томской области, цен на продукцию, урожайности, была составлена таблица стоимости произведенного продукта в Томской области за 2021 год (таблица 3).

**Таблица 3. Некоторые ценовые показатели по пшенице и картофелю в Томской области в 2021 году**

№	Характеристика / Продукт	Пшеница яровая	Пшеница озимая	Картофель
1.				
2.	Произведено во всех хозяйствах	225,8 тыс т	31,3 тыс т	108,5 тыс т
3.	Средняя цена	13 р/кг (13000 р/т)	13 р/кг (15000 р/т)	40 р/кг (40000 р/т)
4.	Урожайность	2,48 т/га	2,94 т/га	15,2 т/га
5.	Стоимость продукта	2,94*10 <sup>9</sup> руб	4,70*10 <sup>8</sup> руб	4,34*10 <sup>9</sup> руб
	Всего	7,75*10 <sup>9</sup> руб (7 750 000 000 руб)		

Таким образом, стоимость произведенного продукта в области составляет более 7 млрд руб. в год. Для вероятности длительных дождливых периодов в 7 %, если считать, что убытки в случае длительных дождей могут составить до 25 % (таблица 2), тогда потери урожая L за год могут составить 1,94 млрд руб. В этом случае для получения минимальных средних потерь от длительных дождей в области за сезон следует предпринимать меры защиты (таблица 2), если их стоимость не превышает 140 млн руб.

1. Немировская Л.Г. Некоторые результаты исследований изменчивости и экстремальности регионального климата (на примере изучения определенных характеристик увлажнения) для юго-востока западной Сибири / Немировская Л.Г., Климов О.В. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 4. № 2. С. 112-116.

2. Горбатенко В.П. Социально-экономические риски Западной Сибири на фоне меняющегося климата // Развитие географических исследований в Беларуси в XX-XXI веках. Материалы международной научно-практической очно-заочной конференции, посвященной 100-летию Белорусского государственного университета, 60-летию кафедры физической географии и образовательных технологий, 100-летию со дня рождения проф. О. Ф. Якушко. Минск, 2021. С. 120-126.

3. Власти Томского района ввели ЧС из-за гибели урожая. URL: <https://tv2.today/News/Vlasti-tomskogo-raiona-vveli-cs-iz-za-gibeli-urozaa> (Дата обращения 05.04.2023).

4. СибНИИГМИ: Специализированные массивы данных о характеристиках увлажнения / URL: <http://meteo.ru/data/685-ispolniteli-po-napravleniyu-1-3-1-3> (Дата обращения 12.01.2023).

5. Российский статистический ежегодник. 2022: Стат.сб. / Росстат. – Р76 М., 2022. 691 с.

6. Мониторинг цен на пшеницу URL: <https://agro-bursa.ru/prices/wheat/> (Дата обращения 29.04.2023).

7. Мониторинг цен на картофель URL: <https://www.google.com/search?q=%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B3+%D1%86%D0%B5%D0%BD+%D0%BD%D0%B0+%D0%BA%D0%B0%D1%80%D1%82%D0%BE%D1%84%D0%B5%D0%BB%D1%8C> (Дата обращения 29.04.2023).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГОВЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ИНДЕКСОВ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НАД АРКТИЧЕСКИМ СЕКТОРОМ РФ

*Кравец К.А., Нечепуренко О.Е.*

Томский государственный университет, [foreveryoungfox@mail.ru](mailto:foreveryoungfox@mail.ru),  
[o.e.nechepurenko@gmail.com](mailto:o.e.nechepurenko@gmail.com)

Изменения климата на планете который год ставятся во главу угла в самых различных науках, поскольку общая тенденция роста температур воздуха по всему земному шару влечет серьезные перемены во всех сферах человеческой деятельности. Арктический регион не располагает достаточным количеством метеоинформации. Северные районы раньше прочих реагируют на климатические перемены, и возросшая повторяемость конвективных явлений требует повышенного внимания. Новизна настоящей работы обусловлена необходимостью более детального изучения состояния атмосферы в Арктическом секторе, а также потребностью в обобщении той информации, которая имеется в распоряжении исследователей.

Целью работы является оценка термодинамических условий над Арктическим сектором РФ. Объектом исследования выступает слой атмосферы до 6 км. Предметом являются индексы неустойчивости атмосферы: Total totals index, Showalter index, K-index, Lifted index, индекс CAPE. Материалом для исследования служат результаты аэрологического зондирования атмосферы на станциях, относящихся к Арктическому сектору РФ, за временной период с 2018 по 2022 гг. (май–сентябрь), а также данные реанализа ERA5 за 2021 г.

Территории, относящиеся к Азиатской части Арктического сектора РФ, в данной работе выделяются по следующему географическому расположению – севернее 60° с. ш. и восточнее 70° в. д., таким образом, на исследуемой территории в настоящее время действуют 22 аэрологических станции. Для наиболее полного ряда данных необходимо отобрать аэрологические станции, расположенные наиболее близко к метеорологическим, что в последующем позволит сопоставить результаты высотных и приземных наблюдений. Итого было отобрано четыре аэрологических станции, расположенных в пределах до 150 км по прямой от метеорологических: Туруханск и Ванавара, Тикси и Якутск, относящихся к Красноярскому краю и Якутии (табл. 1).

**Таблица 1. Основная информация о метеорологических и аэрологических станциях, использованных в работе**

	МС*	АЭРО**	МС*	АЭРО**	МС*	АЭРО**	МС*	АЭРО**
<i>Название</i>	Курейка	Туруханск	Мулорай	Ванавара	Быков мыс	Тикси	Намцы	Якутск
<i>Индекс ВМО</i>	23375	23472	24807	24908	21821	21432	24753	24959
<i>Координаты</i>	66° с.ш. 87° в.д.	66° с.ш. 88° в.д.	61° с.ш. 100° в.д.	60° с.ш. 102° в.д.	72° с.ш. 129° в.д.	71° с.ш. 128° в.д.	63° с.ш. 130° в.д.	62° с.ш. 130° в.д.
<i>Расстояние, км</i>	83		147		42		82	
<i>Субъект РФ</i>	Красноярский край		Красноярский край		Республика Саха (Якутия)		Республика Саха (Якутия)	

*Примечание: \*метеорологическая станция, \*\*аэрологическая станция*

Для определения пороговых значений индексов неустойчивости атмосферы, для каждого из пяти рассматриваемых индексов составляются таблицы за разные сроки зон-

дирования (в 00 и 12 ч), производится подсчет абсолютной, относительной и накопленной частоты. Затем с помощью графиков возможно оценить изменения индексов неустойчивости за исследуемый период и определить пороговые значения для разного процентного числа случаев (50, 70, 90%). Основной упор в оценке сделаем на индекс Total Totals. Так, на аэрологической станции Ванавара, имеющей самое южное положение, кривые распределения индекса Total Totals в разные сроки зондирования имеют схожее распределение (рис. 1). Максимум и в 00, и в 12 часов имеет одинаковое значение (61).

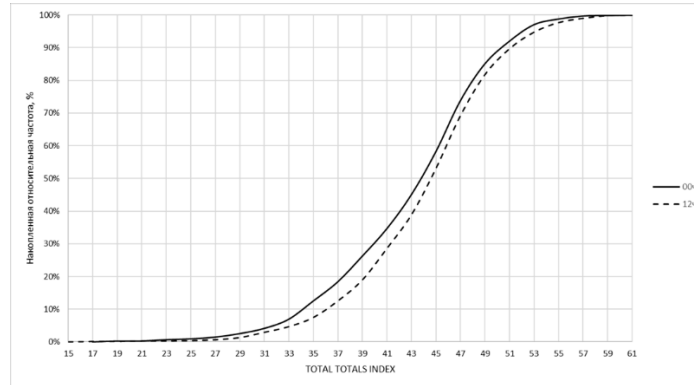


Рисунок 1. Изменение индекса неустойчивости атмосферы Total Totals index на ст. Ванавара за сроки зондирования 00 и 12 часов.

Пороговые значения Total Totals в срок 00 часов в половине и в 90% рассматриваемых случаев иллюстрируют наибольшее значение на станции Ванавара (табл. 2). Если же рассматривать более поздний срок зондирования в 12 часов, то значения индексов будут выше, что связано с более развитой конвекцией во второй половине дня.

**Таблица 2. Пороговые значения индексов неустойчивости за 00 и 12 часов на ст. Ванавара.**

	00 ч			12 ч			
	ВАНАВАРА	50%	70%	90%	ВАНАВАРА	50%	70%
<i>Total Totals</i>	<44	46,5	>50,5	<i>Total Totals</i>	<44,5	47	>51
<i>Showalter</i>	<6	8	>12	<i>Showalter</i>	<5	7,5	>10,5
<i>K-index</i>	<17,5	22	>28	<i>K-index</i>	<18	24	>28,5
<i>Lifted</i>	<6,5	9	>13,5	<i>Lifted</i>	<4	6,5	>10
<i>CAPE</i>	–	21	>90	<i>CAPE</i>	–	50	>200

Пороговые значения конвективных индексов атмосферы существенно различаются для разных географических регионов мира. Так как данная работа подразумевает оценку Арктики, то сравнение целесообразно проводить с северными районами Европы и США, а также результатами, полученными для Сибири. Порог *K-index*, взятый из научных публикаций, в среднем составляет 20 [1], а в данной работе он колеблется от 30 до 40. Индекс *Lifted* в литературе обычно отрицателен, у нас его значения положительны. *Total Totals* в среднем имеет пороговое значение 40, однако, в настоящей работе его значения на 10 единиц больше. Индекс *Showalter* для севера Европы составляет 4, для станций Сибири, расположенных выше 60° с. ш., пороговое значение равно -1 [2], но в нашем исследовании он достигает 15. Индекс *CAPE*, принимающий значения от 1000 до 2500, свидетельствует об умеренной неустойчивости, выше 2500 – крайне неустойчивая атмосфера [3], однако в настоящей работе наибольшее значение индекса составило 550. Таким образом, пороговые значения для Арктического сектора РФ *K-index*, *Lifted index*, *Total Totals*

index, Showalter index оказываются больше, чем те, что встречаются в литературе. Исключение – индекс CAPE, его порог в конечном итоге значительно ниже встречающегося в публикациях других исследователей. Совокупное применение нескольких индексов неустойчивости дает более полную оценку состояния атмосферы.

Рассмотрим значения термодинамических индексов неустойчивости в конкретные дни с грозами, фиксируемые на метеостанциях. Наиболее грозовой месяц, как известно, июль, поэтому сравнительную оценку разумно провести для него. В ходе исследования выделяется метеостанция Муторай, имеющая максимум грозовых дней (16) за теплый период с 2018 по 2022 гг. Возьмем для анализа два дня с грозой в июле (табл. 3).

**Таблица 3. Значения индексов неустойчивости в дни с грозой на метеостанции Муторай.**

Метеостанция/Аэрологическая станция	Дата грозы	Индексы неустойчивости	00ч	12ч
МУТОРАЙ/ВАНАВАРА	30.07.2018	<i>Total Totals</i>	51	46,5
		<i>Showalter</i>	1	3
		<i>K-index</i>	31,5	28
		<i>Lifted</i>	0,5	-0,5
		<i>CAPE</i>	–	164
	14.07.2019	<i>Total Totals</i>	45	50,5
		<i>Showalter</i>	3	-0,5
		<i>K-index</i>	28,5	32
		<i>Lifted</i>	2	-1,5
		<i>CAPE</i>	–	363

30 июля 2018 года значения индексов Total Totals и K-index за оба срока зондирования относятся к порогу 90% случаев. В 12 часов высоки значения индекса CAPE (порог для 90% равен 200). Showalter и Lifted попадают в пороговые значения менее 50%, причем в 12 часов индекс Lifted принимает отрицательное значение. 14 июля 2019 года индексы неустойчивости имеют схожее распределение. CAPE иллюстрирует наибольшее значение за весь период грозовой деятельности на станции и превышает пороговое значение для 90% случаев. Таким образом, можно сделать вывод о большей достоверности диагноза грозовой деятельности Total Totals, K-index и в некоторых случаях индекса CAPE.

Проведем оценку соответствия индекса Total Totals по данным реанализа ERA5 со значениями, рассчитанными по результатам измерений радиозонда. Реанализ представляет собой динамически разглаженные и согласованные данные метеонаблюдений с использованием данных, полученных в результате моделирования. В работе используется реанализ ERA5, являющийся пятым поколением реанализа глобальных атмосферных наблюдений Европейского центра среднесрочных прогнозов.

Используя математический пакет статистического анализа данных «Statistica 10», выборки проверяются на нормальность распределения с помощью критерия Колмогорова–Смирнова. За нулевую принимается гипотеза об отсутствии различий между исследуемым распределением и теоретически ожидаемым нормальным распределением в выборках, таким образом, вероятность уровня значимости  $p$  должна превышать 0,05. Все исследуемые в работе станции подчиняются закону нормального распределения. Следовательно, возможно применить параметрические методы, например, критерий Стьюдента.

В срок зондирования 00 часов критерий Стьюдента оказывается значим ( $p < 0,05$ ) для станции Тикси. Различия между результатами по данным реанализа и радиозонда



существенны. ERA5 занижает значения индекса неустойчивости Total Totals на 15 единиц (табл. 4).

**Таблица 4. Результаты расчета критерия Стьюдента для Total Totals в 00 часов.**

Название станции	ТИКСИ		ТУРУХАНСК		ВАНАВАРА		ЯКУТСК	
	Аэрология	ERA5	Аэрология	ERA5	Аэрология	ERA5	Аэрология	ERA5
Данные	37,2	22,4	39,9	38,7	42,2	40,3	38,7	39,1
Среднее значение	37,2	22,4	39,9	38,7	42,2	40,3	38,7	39,1
СКО	7,5	7,2	7,8	9,9	6,2	11,9	7,1	10,4
N наблюдений	143		145		138		148	
Значимо (З) или не значимо (НЗ)	3		НЗ		НЗ		НЗ	

В срок 12 часов критерий значим при расчете для станций Тикси, Туруханск и Ванавара (табл. 5). Аэрологическая станция Тикси снова иллюстрирует наибольшее расхождение: результаты, вычисленные реанализом, ниже аэрологических на 16 единиц. Итоговые значения для Якутска статистически не значимы.

**Таблица 5. Результаты расчета критерия Стьюдента для Total Totals в 12 часов.**

Название станции	ТИКСИ		ТУРУХАНСК		ВАНАВАРА		ЯКУТСК	
	Аэрология	ERA5	Аэрология	ERA5	Аэрология	ERA5	Аэрология	ERA5
Данные	37,9	22,2	40,5	36,6	43,8	41	42,2	41,3
Среднее значение	37,9	22,2	40,5	36,6	43,8	41	42,2	41,3
СКО	7,8	6,7	7,6	11,9	6,4	11,2	6,4	9,9
N наблюдений	149		143		145		147	
Значимо (З) или не значимо (НЗ)	3		3		3		НЗ	

Подводя итог, следует сказать, что пороговые значения термодинамических индексов неустойчивости атмосферы для Арктического сектора РФ оказываются больше, чем те, что встречаются в литературе для схожих по географии регионов. Результаты, полученные в 12-часовой срок зондирования, превышают значения индексов в 00 часов. При оценке конкретных дней с грозвыми явлениями, Total Totals и K-index демонстрируют лучшие результаты и оказываются выше пороговых значений для 90% случаев. ERA5 занижает значения индекса неустойчивости Total Totals. Реанализ весьма удобен для исследования территорий с редкой сетью метеонаблюдений, однако, один из главных минусов – «сглаживание» и занижение значений в результате интерполяции полей метеовеличин, а также неспособность учитывать особенности рельефа.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/project/22-27-00494/>.

1. DeRubertis D. Recent trends in four common stability indices derived from U.S. radi-sonde observations // American Society Journal. 2006. V.19. P. 309–323.

2. Haklander A. J., Van Delden A. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands // Atmospheric Research. 2003. 67–68. P. 273–299.

3. Нечепуренко О. Е., Горбатенко В. П., Константинова Д. А., Севастьянов В. В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44–59.

## СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ ОСАДКОВ НА ЮГЕ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ И ЗАБАЙКАЛЬЯ ЛЕТОМ 2023 ГОДА

*Латышева И.В., Вологжина С.Ж., Лощенко К.А., Макухин В.Л.*  
Иркутский государственный университет, ababab1967@mail.ru

По данным Росгидромета, наводнениям подвержены около 500 тыс. км<sup>2</sup>, наводнениям с катастрофическими последствиями – 150 тыс. км<sup>2</sup>, где расположены порядка 300 городов, десятки тысяч населенных пунктов, большое количество хозяйственных объектов, более 7 млн. га сельхозугодий [1]. Наводнения являются не только следствием естественных причин, но и разнообразной хозяйственной деятельности, что требует постоянного мониторинга [2]. Среди естественных факторов существенный вклад в формирование благоприятных условий для летних паводков и наводнений вносят синоптические и крупномасштабные циркуляционные процессы. На территории России это чаще всего выходы циклонов с продолжительными и интенсивными дождями, сопровождающиеся резким паводком на реках, активизацией оползней и селей, примером которых можно назвать катастрофическое наводнение 20 и 21 июня 2002 года на реке Кубань [3].

Иркутская область относится к числу регионов с высокой вероятностью наводнений и паводков. На основе ретроспективного анализа числа случаев наводнений в Иркутской области за 30-летний период (1980–2010 гг.) выявлена тенденция роста числа наводнений в регионе [4]. Одним из последних примеров можно назвать катастрофическое наводнение в Иркутской области в июне 2019 года, когда в зону подтопления попали шесть административных районов, погибло 25 человек, пострадали 42762 человека, подтопленными оказались 107 населенных пунктов, почти 11 тысяч жилых домов, 49 участков дорог. По предварительным подсчетам ущерб оценивается в 29 млрд. рублей.

Основной водной артерией Иркутской области считается река Ангара, берущая начало из оз. Байкал и являющаяся самым многоводным притоком Енисея. По данным исследований многолетнего режима 32 гидрологических постов одной из главных причин наводнений в бассейне р. Ангары на территории Иркутской области являются летние дождевые паводки [5]. Они вызваны сильными ливневыми дождями, и чаще всего им подвержены юго-западные районы области, где расположены водосборные бассейны левобережных притоков Ангары (реки Бирюса, Уда, Ия, Ока, Большая Белая, Китой, Иркут и др.) и оз. Байкал (реки Хара-Мурин, Утулик, Голоустная и др.). В этой связи выполнено исследование синоптических условий выпадения продолжительных осадков на юге Иркутской области и Забайкалья в период с 30 июня по 6 июля 2023 года. В конце июня 2023 года в Казачинско-Ленском районе Иркутской области был объявлен режим чрезвычайной ситуации из-за повышения уровня воды в реке Киренга. Сложная гидрологическая ситуация сложилась в Слюдянском районе на побережье оз. Байкал, где за сутки выпало 116 мм осадков, что привело к паводку. В Черемховском районе продолжительные дожди стали причиной частичного разрушения моста у с. Олот.

По данным метеорологической станции Иркутск за период с 1 по 7 июля 2023 года выпало 63 мм при месячной норме 107 мм (59%). Максимум осадков пришелся на 5 и 6 июля, ухудшение видимости в осадках достигало 2,3 км, а усиление северо-западного ветра 13 м/с. В Нижнеудинске продолжительные осадки были зафиксированы 2-5 июля (32% месячной нормы), максимум отмечался 4 июля, наблюдалось ухудшение видимости в осадках до 4 км, усиление северо-западного ветра до 11 м/с. В Братске атмосферные осадки отмечались 3-6 июля с ухудшением видимости до 7 км и усилением северо-западного ветра до 11 м/с. На территории Забайкалья в Улан-Удэ атмосферные осадки наблюдались 2-6 июля, максимум осадков отмечен 5 июля с ухудшением видимости до

10 км. В Чите осадки выпадали с 3 по 8 июля (64% месячной нормы), максимум (37 мм) приходится на 4 июля с ухудшением видимости до 0,5 км и северо-восточного ветра до 13 м/с.

Как показал синоптический анализ приземных и высотных карт погоды у поверхности Земли выпадение продолжительных осадков в начале июля 2023 года на территории Иркутской области и Забайкалья связано с процессами активного цикло- и фронто-генеза как у поверхности Земли, так и в средней и верхней тропосфере. Формирование продолжительных обложных и ливневых осадков на юге Иркутской области и Забайкалья происходило в зоне взаимодействия усиливающегося с запада гребня Саянского антициклона и углубляющейся китайско-монгольской депрессии, где за счет за счет увеличения термических и барических градиентов существенно возросла интенсивность и протяженность зоны атмосферных осадков, вытянутая в меридиональном направлении (рис.1). При возрастании скорости ветра на южной периферии монгольского циклона происходило интенсивное вовлечение в циклон теплого субтропического воздуха с юга, а при объединении с пекинским центром низкого давления влажного тихоокеанского воздуха с акватории Желтого моря в передней части обширного циклона.

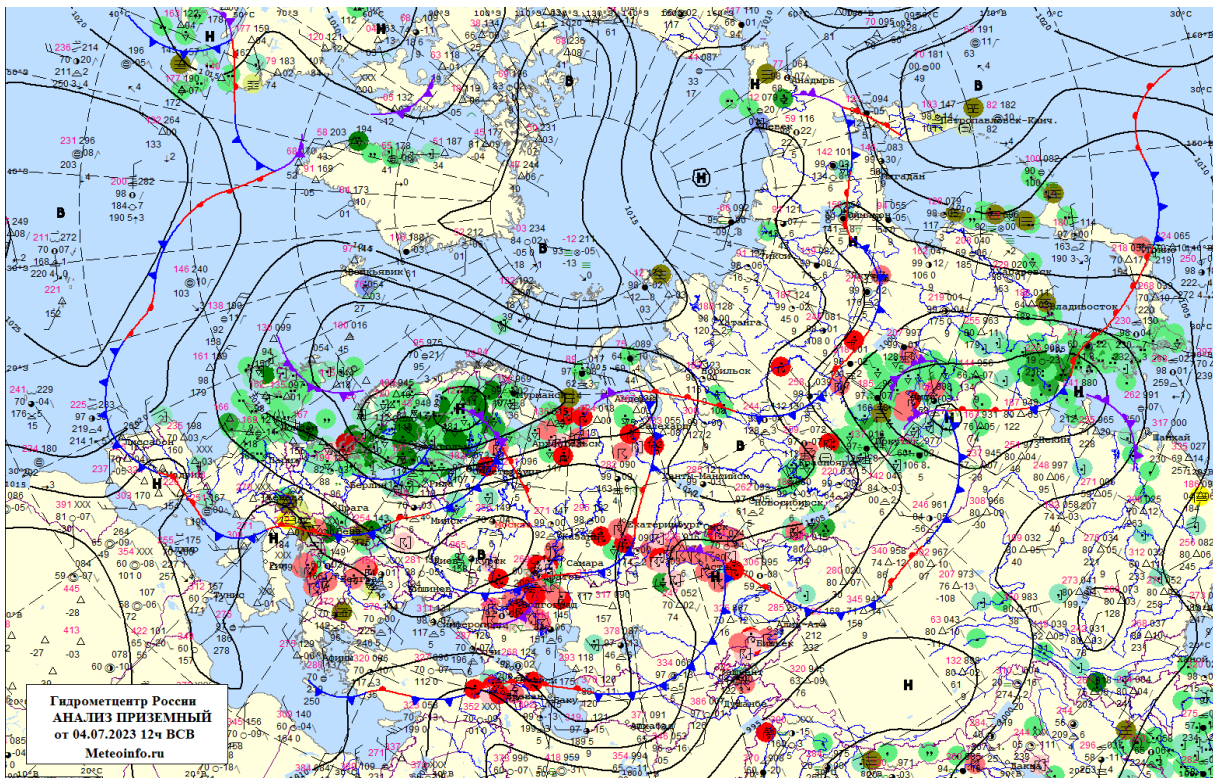


Рисунок 1. Приземная карта за 12.00 ВСВ 04.07.2023 года Гидрометцентра России.

В средней и верхней тропосфере при углублении ложбины холода, ориентированной с районов Новой Земли через районы Иркутска до 40°с.ш., образовался монгольский циклон, который углубляется и также значительно увеличивался по площади. Усиление адвекции холода в его тыловой части и приток теплого влажного воздуха в передней части с акватории Желтого моря в условиях усиления ветра на высотах длительное время поддерживали благоприятные условия для усиления восходящих потоков, развития облачности и выпадения продолжительных и интенсивных осадков на юге Иркутской области и в Забайкалье (рис. 2).

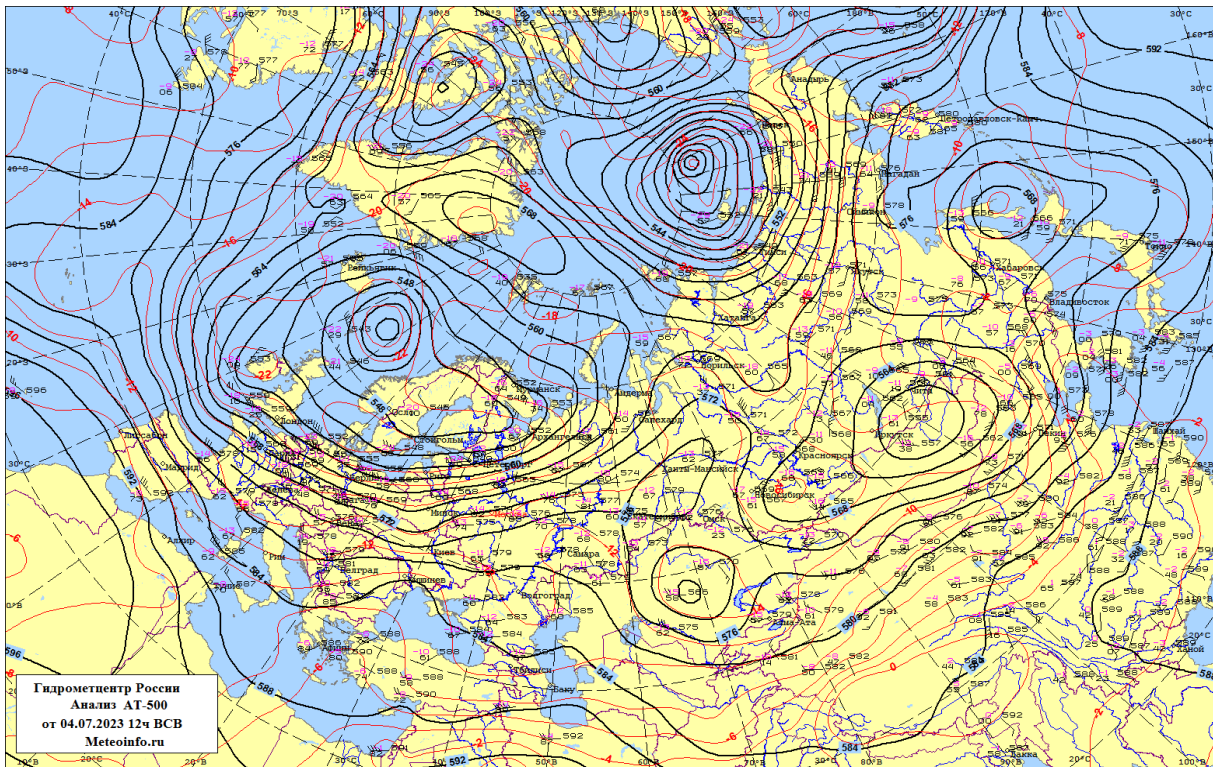


Рисунок 2. Карта АТ-500 гПа за 12.00 ВСВ 04.07.2023 года Гидрометцентра России.

Формированию продолжительного периода летних осадков в Иркутской области в 2023 году во многом способствовали длительное время сохраняющиеся весной и в начале лета зимние типы атмосферных процессов. При стационарировании холодного циклонического вихря над Таймыром на территорию Иркутской области осуществлялись частые загоны холода и, как следствие, происходило обострение полей облачности и атмосферных осадков, способствующих накоплению почвенной влаги. В начале июля 2023 года вторжения арктического холода были настолько активны, что достигли широт субтропиков (32-35° с.ш.), в результате чего возник высокий монгольский циклон, который простирался до высот 10-12 км и занимал большую площадь, что позволило вовлечению в циклон теплого влажного воздуха с тихоокеанского побережья. Кроме того, при усилении ветровых потоков на высотах вдоль южной периферии циклона осуществлялись вторжения теплого с большими запасами абсолютного влагосодержания субтропического воздуха, что при сохраняющейся с севера адвекции арктических воздушных масс способствовало фронтогенезу.

Таким образом, вновь в паводкоопасной ситуации на юге Иркутской области в июле 2023 года аналогично катастрофическому наводнению в Тулуне летом 2019 года мы столкнулись с влиянием множества причин, в том числе влияния теплых субтропических, холодных арктических и влажных тихоокеанских воздушных масс, которые проявили себя в развитии обширного монгольского циклона. Возможно, это далеко не все причины, которые еще нужно анализировать, можно отметить и влияние гребня антициклона с центром над Европейской частью России, а также блокирующего тихоокеанского гребня. Определенно есть аналогия и с наводнениями 1971 и 2001 годов на юге Иркутской области. Причем сейчас прогнозировать такие события становится сложнее на фоне более выраженной изменчивости атмосферных процессов.

1. Мингалеев С.Г. Человеческий фактор в природных чрезвычайных ситуациях // В сборнике: Природопользование: от истории к современности. Куражковские чтения. Материалы I Международной научно-практической конференции. Составитель А.Н. Бармин. Астрахань, 2022. С. 101-108.

2. Zahran, S., Brody, D. C., Peacock, G.W., Vedlitz A. and Grover, H. Social Vulnerability and the Natural Built Environment: A Model of Flood Casualties in Texas. 2008. Vol. 32 (4): P. 537-560.

3. Тамбиева Д.А., Эркенова М.У. Наводнения, условия возникновения, виды, классификация // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 90-4. С. 39-41.

4. Тимофеева С.С., Эглит В.Э., Морозова О.В. Мониторинг наводнений на территории Иркутской области на основе ретроспективного анализа // Вестник ИрГТУ. 2011. № 9. С. 82–89.

5. Слепнева Е.В., Парыгина Е.А., Кичигина Н.В. Генезис наводнений в Иркутской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2020. Т.34. С. 96-112.



## СИНОПТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ ВЕТРА НА АЭРОДРОМАХ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ И ЗАБАЙКАЛЬЯ ВЕСНОЙ 2023 ГОДА

*Латышева И.В., Вологжина С.Ж., Лощенко К.А., Макухин В.Л.*  
Иркутский государственный университет, ababab1967@mail.ru

Территория Иркутской области – сложный регион в орографическом отношении, что сказывается как в проявлении и разнообразии региональных типов атмосферных процессов, так и в характеристиках ветрового режима. Особый интерес представляет режим сильного ветра ( $\geq 15$  м/с), который относится к опасным явлениям погоды, представляющим угрозу для взлета и посадки воздушных судов, особенно при наличии боковой составляющей, для работы башенных кранов, линий электропередач и т.д. Наиболее благоприятные условия для усиления ветра на территории Иркутской области складываются в переходные сезоны года при более частых выходах циклонов и связанных с ними атмосферных фронтов, преимущественно холодных. Весной дополнительный вклад в усиление ветра до штормового вносит термическая составляющая, проявляющаяся в усилении турбулизации приземного слоя атмосферы в условиях увеличивающегося потока солнечной радиации. В этой связи в работе выполнено исследование циркуляционных и синоптических факторов продолжительного усиления ветра на территории Иркутской области и Забайкалья на примере весны 2023 года.

30 и 31 марта 2023 года в Иркутской области и Забайкалье отмечалось продолжительное усиление ветра, которое сопровождалось выпадением обложных и ливневых осадков, метелями с ухудшением горизонтальной дальности видимости. В работе выполнен совместный метеорологический и синоптический анализ погодных условий по данным аэродромов Иркутск, Братск, Киренск, Улан-Удэ и Чита. В качестве исходной информации были использованы: ежечасные метеорологические данные аэродромов с сайта Росгидромета гр-5; 6-ти часовые приземные карты погоды; 12-ти часовые высотные карты (АТ-850 гПа, АТ-700 гПа, АТ-500 гПа, АТ-300 гПа) Гидрометцентра России; данные аэрологического зондирования станций Ангарск, Братск, Киренск и Чита Росгидромета; космические снимки облачного покрова и карты нефанализа Сибирского Центра НИЦ «Планета»; данные реанализов ERA5.

Для определения причин усиления ветра:

- проводился сравнительный анализ динамики основных барических образований, которые определяли погодные условия в районе аэродромов;
- рассчитывались температурные и барические градиенты на разных уровнях тропосферы в области высотной фронтальной зоны;
- определялись изменения высоты уровня тропопаузы и температуры на ее нижней границе;
- проводилось дешифрирование космических снимков облачного покрова;
- расчет аномалий полей приземного давления и геопотенциала.

Как показал анализ метеорологических условий усиление северо-западного ветра на аэродроме Иркутск отмечалось 31 марта с 4 до 13.30 часов местного времени, максимальные порывы ветра в 4 утра достигали 24 м/с, в 8 утра 21 м/с. Усиление ветра происходило на фоне падения температуры воздуха на  $10^{\circ}\text{C}$  и повышения атмосферного давления на 12 гПа, сопровождалось выпадением ливневого снега и метелью с ухудшением горизонтальной дальности видимости до 600 метров. На аэродроме Братск усиление северо-западного ветра отмечалось с 23 часов местного времени 30 марта до 8 часов 31 марта, порывы ветра были ниже, чем в Иркутске (до 11 м/с). Усиление ветра происходило на фоне падения температуры воздуха на  $7^{\circ}\text{C}$  и повышения атмосферного давления

на 12 гПа, сопровождалось выпадением ливневого снега без ухудшения видимости ниже минимумов аэродрома. На аэродроме Киренск усиление северного и северо-западного ветра отмечалось с 8 утра местного времени 30 марта до 11 утра 31 марта, как и в Братске, порывы были ниже, чем в Иркутске и достигали 12 м/с. Усиление ветра происходило на фоне падения температуры воздуха на 12°C и повышения атмосферного давления на 10 гПа, сопровождалось выпадением ливневого снега с метелью с ухудшением видимости до 2 км. На аэродроме Улан-Удэ усиление северного и северо-западного ветра отмечалось 31 марта с 9 до 23 часов местного времени, максимальные порывы ветра достигали в 10 утра 20 м/с. Усиление ветра происходило на фоне падения температуры воздуха на 11°C и повышения атмосферного давления на 15 гПа, сопровождалось выпадением слабого ливневого снега без ухудшения видимости ниже минимумов аэродрома. На аэродроме Чита усиление ветра преимущественно западного направления отмечалось 31 марта с 15 до 23 часов местного времени, максимальные порывы ветра достигали в 18 часов 21 м/с. Усиление ветра происходило на фоне падения температуры воздуха на 15°C и повышения атмосферного давления на 8 гПа, сопровождалось позёмком без ухудшения видимости ниже минимумов аэродрома.

У поверхности Земли усиление ветра на аэродромах Иркутск, Братск, Киренск, Улан-Удэ и Чита 30 и 31 марта 2023 года было связано с прохождением холодного атмосферного фронта, в зоне которого осуществлялся фронтогенез за счет увеличения термических и барических градиентов при взаимодействии усиливающегося антициклона с центром над Западной Сибирью и углубляющегося монгольского циклона, который сформировался в ложбине ныряющего циклона 30 марта в 12 ВСВ (рис. 1). В средней тропосфере на уровне изобарической поверхности АТ-500 гПа (5 км) усиление ветра на аэродромах было связано с прохождением оси высотной ложбины с условиями термического фактора фронтогенеза 30 марта 2023 года в 12 ВСВ и термического и барического факторов фронтогенеза 31 марта 2023 года в 00 ВСВ.

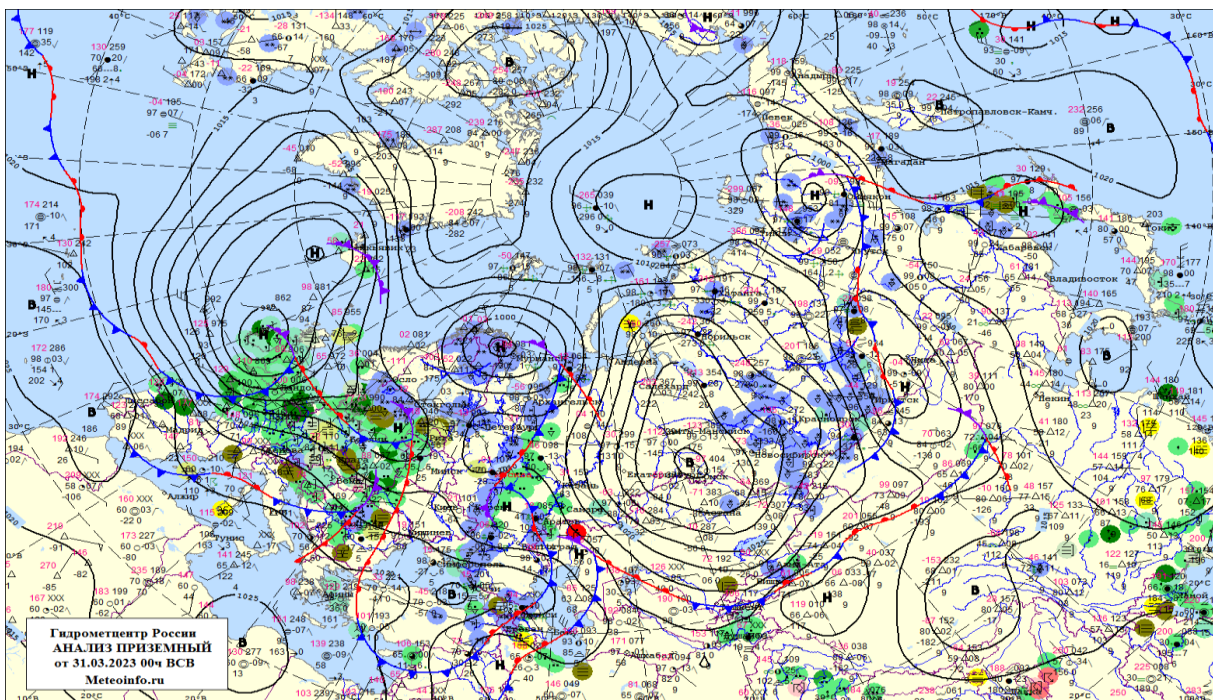


Рисунок 1. Приземная карта за 00.00 ВСВ 31.03.2023 года Гидрометцентра России.

В верхней атмосфере усиление ветра отмечалось при переходе с антициклональной на циклональную сторону струйного течения, максимальные значения скорости (162



км/ч) вдоль оси которого отмечались 31 марта 2023 года в 00 ВСВ, когда максимальные скорости ветра были отмечены у поверхности Земли на аэродромах Иркутск и Улан-Удэ.

Анализ полей облачности по космическим снимкам Сибирского центра НИЦ «Планета» показал следующее. Усиление ветра в северных районах Иркутской области 30 марта 2023 года происходило на фоне прохождения облачности холодного фронта, где имело место уплотнение облачности за счет фронтогенеза вдоль оси холодной ветви динамически значимой высотной фронтальной зоны умеренных широт. Усиление ветра в южных районах Иркутской области и в Забайкалье 31 марта 2023 года осуществлялось при объединении облачных массивов холодного фронта с облачностью монгольского циклона, что подтверждают карты нефанализа (рис. 2). Это способствовало усилению интенсивности выпадения атмосферных осадков и, как следствие, понижению горизонтальной дальности видимости в районе аэродрома Иркутск до градаций 600 метров, а также продолжительному усилению ветра на аэродромах Улан-Удэ и Чита под влиянием нисходящих потоков холодного воздуха, вовлекаемого осадками. На фронтогенез указывают выбросы перистообразной облачности в циклоне.

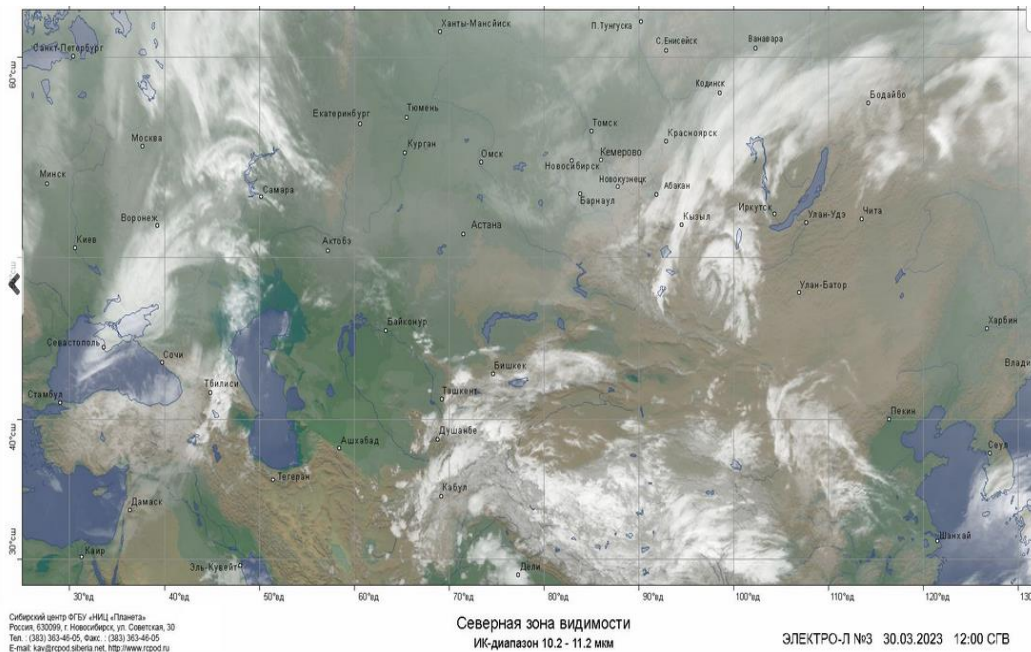


Рисунок 2. Снимок облачности за 12.00 ВСВ 30.03.2023 Сибирского Центра НИЦ «Планета».

По данным аэрологического зондирования атмосферы усиление ветра в Иркутске сопровождалось понижением уровня тропопаузы с 11 км до 10040 м с повышением температуры на нижней границе тропопаузы на 11,4°C и наличием сдвигов ветра в слое от 580 гПа до 600 гПа; в Киренске понижением уровня тропопаузы с 10947 м до 9638 м с повышением температуры на нижней границе тропопаузы на 5,2°C и наличием сдвигов ветра в слое от 900 гПа до 800 гПа; в Братске понижением уровня тропопаузы с 11643 м до 9700 м с повышением температуры на нижней границе тропопаузы на 11,4 °C и наличием сдвигов ветра в слое от 900 гПа до 800 гПа; в Чите понижением уровня тропопаузы с 10230 м до 9380 м с повышением температуры на нижней границе тропопаузы на 1,3°C.

Существенный вклад в усиление ветра на аэродромах Иркутск, Братск, Киренск, Улан-Удэ и Чита 30 и 31 марта 2023 года и увеличение его продолжительности, вносили адвективно-динамические факторы падения давления на высотах (рис. 3).

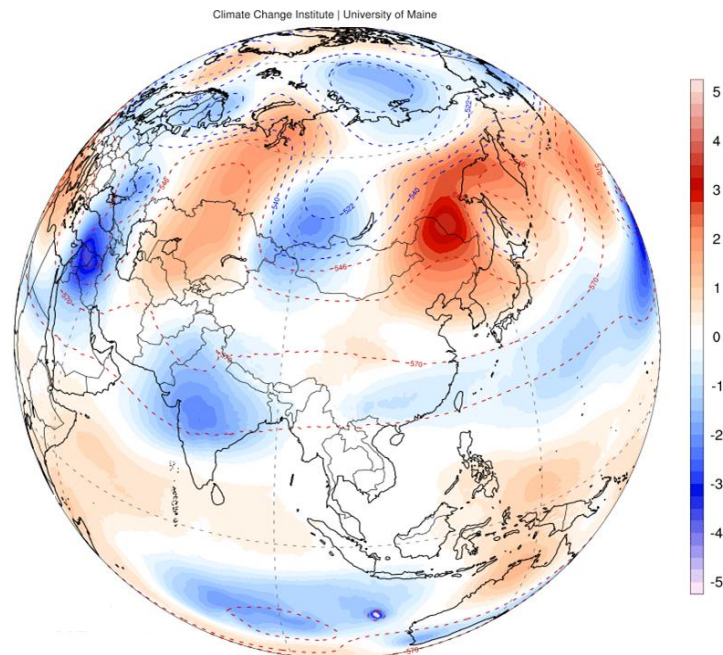


Рисунок 3. Аномалии АТ-500 гПа 31.03.2023 года.

Продолжительное усиление преимущественно северного и северо-западного ветра на аэродромах Иркутск, Улан-Удэ и Чита в марте 2023 года было связано в нижней тропосфере с прохождением холодного атмосферного фронта и фронтогенезом за счет совместного вклада термических и барических градиентов при взаимодействии усиливающегося антициклона с центром над Западной Сибирью и углубляющегося монгольского циклона. В средней тропосфере более выражено влияние термического фактора фронтогенеза вдоль оси высотной ложбины при усиливающейся адвекции холода при переходе с антициклональной стороны верхнетропосферного струйного течения на циклональную.

Длительности сохранения термических и барических составляющих усиления приземного ветра способствовало усиление антициклогенеза над Западной Сибирью; циклогенеза над Забайкальем и Монголией; наличие блокирующего гребня над Дальним Востоком.

Для распознавания такого типа атмосферных процессов надежным признаком является увеличение прогиба облачности на космических снимках и появление выбросов перистообразных облаков; понижение уровня тропопаузы и оценка термической и барической составляющей фронтогенеза, который может различаться на разных уровнях тропосферы.

## ОЦЕНКИ СВЯЗИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ЭКСТРЕМАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ, НА РАЗНЫХ ВРЕМЕННЫХ МАСШТАБАХ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ В 1980-2020 ГГ.

*Логинов С.В., Золотов С.Ю., Морару Е.И., Харюткина Е.В.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
kh\_ev@imces.ru

Одним из распространенных методов изучения климатологии аномалий метеорологических величин является анализ свойств их функции распределения вероятностей (ФРВ), выявляющий изменчивость ее характеристик для разных регионов на длительных интервалах времени.

Атмосферные процессы оказывают значительное влияние на асимметрию распределений метеорологических переменных, в частности температуры [1, 2]. В большинстве случаев, атмосферные переменные не имеют гауссового распределения плотности вероятности, поскольку атмосфера представляет собой сложную нелинейную систему с несколькими врожденными асимметриями (вращение Земли, неравномерная инсоляция, изменение парциального давления водяного пара в зависимости от температуры и т. д. [3]. При этом, метеорологические переменные имеют свою индивидуальную форму ФРВ, которая может изменяться в зависимости от среднего состояния климата [4, 5].

Выявлено, что разные временные масштабы атмосферных процессов могут вносить различный вклад нелинейных взаимодействий в динамику атмосферы. Согласно [1], процессы адвекции тепла синоптического масштаба и вихревой циркуляции связаны с аномальной температурой и скоростью ветра.

Также, известно, что, при потеплении, увеличению скорости генерации вихрей способствует увеличение вертикального градиента температуры в тропосфере с уменьшением статической устойчивости [6]. Следовательно, на генерацию вихрей, в некоторые сезоны года, будут оказывать значимое влияние вертикальная компонента скорости ветра и вертикальные потоки тепла (включая область стратосферно-тропосферного обмена).

Проблема выявления возмущений в атмосфере, связанных с соответствующими процессами, которые протекают на фоне изменения климата, а также проблема их долгосрочной изменчивости (предсказуемости) представляет большой интерес и является трудоемкой задачей.

Для дальнейших исследований были отобраны аномалии основных метеорологических переменных Северного полушария за 1979–2018 гг. соответствующие экстремальным значениям и отличающиеся от гауссового распределения, а также определены характеристики и тенденции во временных рядах, включая изменчивость синоптического масштаба.

Расчеты проводились для тропосферы Северного полушария (1000 гПа и 500 гПа) и на основе исходных временных рядов метеорологических параметров из 6-часовых данных реанализа Era Interim с пространственным разрешением  $1,125^\circ \times 1,125^\circ$  для интервала 1979–2018 гг. Из этих рядов по [7] выделялась изменчивость синоптического масштаба – 2–7 дней.

Из исходного временного ряда ( $TS$ ) и временного ряда синоптической изменчивости ( $SV$ ) были получены временные ряды аномалий следующих метеопараметров: температуры воздуха ( $t'$ ), удельной влажности воздуха ( $q'$ ), составляющих скорости ветра (зональной –  $u'$ , меридиональной –  $v'$  и вертикальной –  $\omega'$ ) и геопотенциала ( $\Phi'$ ).

Под аномалией понималась безразмерная величина  $x'(t, m) = (X(t, m) - \mu(y(t), m)) / \sigma_m$ , представляющая собой отклонение переменной  $X(t, m)$  от среднего значения  $\mu(y(t), m)$  для сезона ( $m=1, \dots, 4$ ) для каждого года ( $y \in [1979, \dots, 2018]$ ) и нормализованного на стандартное отклонение ( $\sigma_m$ ),  $\sigma_m^2 = \overline{(X(t, m) - \mu(y(t), m))^2}$ .

Была проанализирована пространственно-временная изменчивость числа аномалий  $x'(t)$  (далее  $N$ ) как для  $TS$ , так и для  $SV$ .

Границы диапазона негауссовых аномалий ( $a_N$  и  $a_P$ ) определялись из условия превышения более чем в два раза (для экстремальных событий) эмпирического распределения вероятностей гауссовского распределения вероятностей для той же переменной.

Найденные значения  $a_N$  и  $a_P$  позволяют разделить диапазоны гауссовских и негауссовских событий, т.е. стационарных и нестационарных процессов. Таким образом, мы можем выявить экстремальные характеристики аномалий (негауссовы аномалии) в диапазоне  $[-7,5, a_N] \cup [a_P, 7,5]$ . Именно эти аномалии мы анализируем далее как для  $TS$ , так и для  $SV$ .

Статистическая значимость полученных оценок определялась с помощью двустороннего t-критерия нулевой гипотезы при  $\alpha = 0,05$ .

Для получения статистически значимых оценок межгодовой изменчивости экстремальных событий применялась процедура осреднения  $N$  по участку поверхности (боксу), с пространственными размерами: в зональном направлении  $\sim 1000$  км, а в меридиональном направлении  $\sim 500$  км. Хотя эта процедура может привести к ухудшению пространственного разрешения, она позволяет уменьшить количество пропусков во временных рядах и, следовательно, стабилизировать характеристики межгодовой изменчивости.

Роль атмосферных процессов в генерации экстремальных событий оценивалась по величине коэффициента множественной корреляции.

Рассчитанные ряды аномалий были нормализованы и подготовлены к их использованию в регрессионном анализе. С помощью данного регрессионного анализа определялась роль влияния ряда внешних факторов на возникновение экстремальных значений исследуемых величин. К внешним факторам в данном случае относятся индексы глобальной атмосферной циркуляции (индексы Северо-Атлантического колебания (NAO), Арктического колебания (AO), Тихоокеанского Декадного колебания (PDO), Эль-Ниньо – Южного колебания (SOI, NINO3.4), Скандинавский индекс (SCAND)), а также разница вертикальной скорости ветра между уровнями 300 и 100 гПа ( $\Delta\omega = \omega(300) - \omega(100)$ ), параметр Eady (EGR), величина потенциальной завихренности (PVE), компоненты вектора потока Элиаса-Палмера ( $F_y, F_p$ ) и параметры субтропического струйного течения – максимальная скорость ( $Jet_{MaxSpeed}$ ) и широтное положение ( $Jet_{Lat}$ ).

Предварительно, перед расчетами коэффициентов регрессии, был определен набор независимых друг от друга факторов для получения корректных решений регрессионных уравнений и исключения учета влияния зависимых между собой предикторов. Количество независимых факторов определялось по количеству собственных значений корреляционной матрицы факторов, описывающих 70% изменчивости дисперсии. Сами факторы выбирались с помощью оптимизационного алгоритма анализирующего значения коэффициентов межфакторной корреляции ( $r$ ).

Оказалось, что количество факторов и состав множества, меняется как от сезона года, так и от местоположения рассматриваемого бокса. Например, в зимний сезон связь между индексами AO и SCAND является отрицательно-значимой ( $r = -0,69$ ), а в летний сезон – положительно-незначимой ( $r = 0,07$ ).

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300154-1.

1. Garfinkel CI, Harnik N (2017) The non- Gaussian and spatial asymmetry of temperature extremes relative to the storm track: The role of horizontal advection. *J Clim* 30:445–464.
2. Tamarin-Brodsky T, Hodges K, Hoskins BJ, Shepherd TG (2019) A Dynamical Perspective on atmospheric temperature variability and its response to climate change. *J Climate* 32:1707–1724.
3. Perron M, Sura P (2013) Climatology of Non-Gaussian Atmospheric Statistics. *J Clim* 26:1063–1083.
4. Brönnimann, S, Luterbacher J, Ewen T, Diaz HF, Stolarski RS, and Neu U (2008): *Climate Variability and Extremes during the Past 100 Years*. 1<sup>st</sup> ed. Springer-Verlag, 364 pp.
5. Houghton J (2009) *Global Warming: The Complete Briefing*. 4<sup>th</sup> ed. Cambridge University Press, 438 pp.
6. Интенсивные атмосферные вихри и их динамика. Под ред. И.И. Мохова, М.В. Курганского, О.Г. Чхетиани. М.: ГЕОС. 2018. 482 с.
7. Loginov SV, Eliseev AV, Mokhov II (2017) Impact of non-Gaussian statistics of atmospheric variables on extreme intramonth anomalies. *Izv Atmos Ocean Phys* 53:269–278.

## ТЕНДЕНЦИИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ В НАЧАЛЕ 21 ВЕКА

*Логинов С.В.<sup>1</sup>, Морару Е.И.<sup>1</sup>, Харюткина Е.В.<sup>1,2</sup>,*

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
kh\_ev@imces.ru

<sup>2</sup>Центр научных исследований и разработок, г. Великий Новгород

На фоне глобальных изменений приземной температуры воздуха в конце XX – начале XXI веков [1] наблюдается увеличение аномалий метеорологических параметров, а также увеличение повторяемости и вредоносности опасных и неблагоприятных природных явлений. Изменения климата влияют на средние значения метеорологических параметров и на его положительные и отрицательные аномалии, при этом частота и амплитуда их изменения зависит от региона [2]. Экстремальные явления часто связаны с аномальными крупномасштабными процессами циркуляции атмосферы. Согласно расчетам некоторых климатических моделей, уменьшение меридионального градиента температуры в результате ускоренного потепления Арктики может привести к уменьшению колебаний приземной температуры в средних широтах [1]. Сдвиг струйных течений к полюсам также может привести к увеличению экстремальных низких температур [3].

Одним из распространенных методов изучения климатологии аномалий является анализ свойств их функции распределения вероятностей (ФРВ), выявляющий изменчивость ее характеристик для разных регионов на длительных интервалах времени.

Атмосферные процессы оказывают сильное влияние на асимметрию распределений метеорологических переменных, в частности температуры [3, 4]. В целом атмосферные переменные не имеют гауссовой ФРВ, поскольку атмосфера представляет собой сложную нелинейную систему [5]. При этом, метеорологические переменные имеют свою индивидуальную форму ФРВ. Используя алгоритм кластеризации в [4] было выделено 5 типов ФРВ температуры воздуха над Северной Америкой.

Важность анализа «хвостов» ФРВ для исследования изменения климата показана в [6], где потепление климата соответствует увеличению длины положительного «хвоста» в распределении температуры и к уменьшению скорости изменения частоты экстремально теплых явлений, а распределения с коротким «хвостом» более чувствительны к изменению среднего значения, чем распределения с длинным «хвостом».

Разные временные масштабы атмосферных процессов, например, процессы синоптической температурной адвекции и вихревой циркуляции важны для исследования связи между аномальной температурой и скоростью [3].

Выявление возмущений в атмосфере, связанных с процессами, протекающими на фоне изменения климата, а также проблема их долгосрочной изменчивости (предсказуемости) представляет большой интерес и при этом является трудоемкой задачей.

В упомянутых выше исследованиях (которые проводились, преимущественно, для температуры воздуха) одним из элементов анализа являлось выявление причин изменчивости первых моментов/кумулянтов аномалии ФРВ: среднего, дисперсии, коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса (используются гораздо реже) с последующим анализом их климатологии. Отличие предложенного в рамках исследования подхода заключается в определении интервалов экстремальных значений негауссовых аномалий основных метеорологических переменных и последующем использовании интервалов для климатологических оценок.

В рамках настоящего исследования были получены оценки пространственного и временного распределения негауссовых аномалий климатических параметров Северного

полушария за 1979–2018 гг., а также определены характеристики и тенденции во временных рядах, включая изменчивость синоптического масштаба.

Расчеты проводились для тропосферы Северного полушария за интервал времени 1979–2018 гг.. Использовались временные ряды метеорологических параметров реанализа Era Interim с пространственным разрешением  $1,125^\circ \times 1,125^\circ$  и 6-часовым временным шагом на уровнях высоты 1000 гПа и 500 гПа ( $TS$ ). Из рядов  $TS$  по [7] выделялась изменчивость синоптического масштаба продолжительностью 2–7 дней ( $SV$ ). Из рядов  $TS$  и  $SV$  были получены временные ряды аномалий метеопараметров: температуры воздуха ( $t'$ ), удельной влажности воздуха ( $q'$ ), составляющих скорости ветра (зональной –  $u'$ , меридиональной –  $v'$  и вертикальной –  $\omega'$ ) и геопотенциала ( $\Phi'$ ).

Под аномалией понималась безразмерная величина  $x'(t, m) = (X(t, m) - \mu(y(t), m)) / \sigma_m$ , представляющая собой отклонение переменной  $X(t, m)$  от среднего значения  $\mu(y(t), m)$  для сезона ( $m=1, \dots, 4$ ) для каждого года ( $y \in [1979, \dots, 2018]$ ) и нормализованного на стандартное отклонение ( $\sigma_m$ ),  $\sigma_m^2 = \overline{(X(t, m) - \mu(y(t), m))^2}$ .

В работе была проанализирована пространственно-временная изменчивость числа аномалий ( $N$ ) как для  $TS$ , так и для  $SV$ . Значение  $N$ , превышающее заданную амплитуду возмущения ( $a$ , где  $-7,5 \leq a \leq 7,5$ ), определялось в области отрицательных аномалий ( $a_N$ ) как  $N^-(x'(t) < -a)$  и в области положительных аномалий ( $a_P$ ) как  $N^+(x'(t) > a)$ . Использование часовых данных реанализа за сезон за 40-летний интервал времени позволяет рассчитать вероятность событий для  $|a| > 4$ .

Границы диапазона негауссовых аномалий ( $a_N$  и  $a_P$ ) определялись из условия превышения более чем в два раза (для экстремальных событий) эмпирической ФРФ относительно гауссовской ФРВ для переменной.

Тренды  $N^-$  или  $N^+$  оценивались по межгодовым значениям числа аномалий на временных интервалах: 1979–1998 и 1999–2018 гг. Межгодовую изменчивость аномалий, инерционность и трендовую устойчивость изменений оценивали с помощью параметра Херста ( $H$ ), определяемого методом R/S-анализа [8].

Установлено, что аномалии временных рядов описывают преимущественно три типа эмпирических плотностей распределения процессов: распределение, близкое к гауссовскому ( $u'$  и  $v'$ ); распределение с положительной/отрицательной асимметрией ( $\Phi'$ ,  $t'$  и  $q'$ ); распределение со значимым эксцессом и значительным превышением эмпирической ФРВ над гауссовой ФРВ как в области отрицательных, так и положительных значений ( $\omega'$ ). Третий тип преобладает для аномалий синоптического масштаба (до ~80% случаев).

Установлено, что в начале XXI века по сравнению с концом XX века как для  $TS$ , так и для  $SV$  увеличивается количество аномалий  $u'$ ,  $v'$ ,  $\omega'$  и  $q'$  в первой половине года в целом для всего Северного полушария (рис. 1а). Число аномалий  $t'$  и  $\Phi'$  для исходного временного ряда, напротив, уменьшается, а что касается синоптического временного масштаба, то в низких широтах наблюдается увеличение количества экстремальных событий (рис. 1б).

Районы с максимальным количеством аномалий климатических параметров расположены, как правило, преимущественно над континентами: зимой — северная часть Дальнего Востока и Северной Америки, а также в Сибирском регионе; летом – в низких широтах. Исключением являются аномалии вертикальной скорости ветра, которые расположены главным образом над океанами (средние широты Тихого и Атлантического океанов, вблизи течений Куроисио и Гольфстрим, субполярные круговороты). При этом, стоит отметить, что для  $TS$  количество аномалий  $\omega'$  в средних широтах Тихого океана в начале XXI в., по сравнению с концом XX века, увеличивается, а в средних широтах Северной Атлантики уменьшается (рис. 2а). Для  $SV$  в районах Охотского моря, Дальнего



Востока и Баренцева моря происходит рост  $\omega'$ , а в остальных районах Северного полушария количество аномалий вертикальной скорости ветра сокращается в начале XXI в. (рис.2б).

Применение R/S-анализа в рамках нашего исследования позволило установить, что выявленные тенденции будут иметь устойчивый характер (персистентные процессы  $H>0,72$ ) в указанных выше регионах и в океанских районах Российской Арктики. При этом количество регионов с антиперсистентными процессами ( $H<0,33$ ) уменьшается. Аномалии синоптического масштаба более предсказуемы по сравнению с аномалиями исходного ряда.

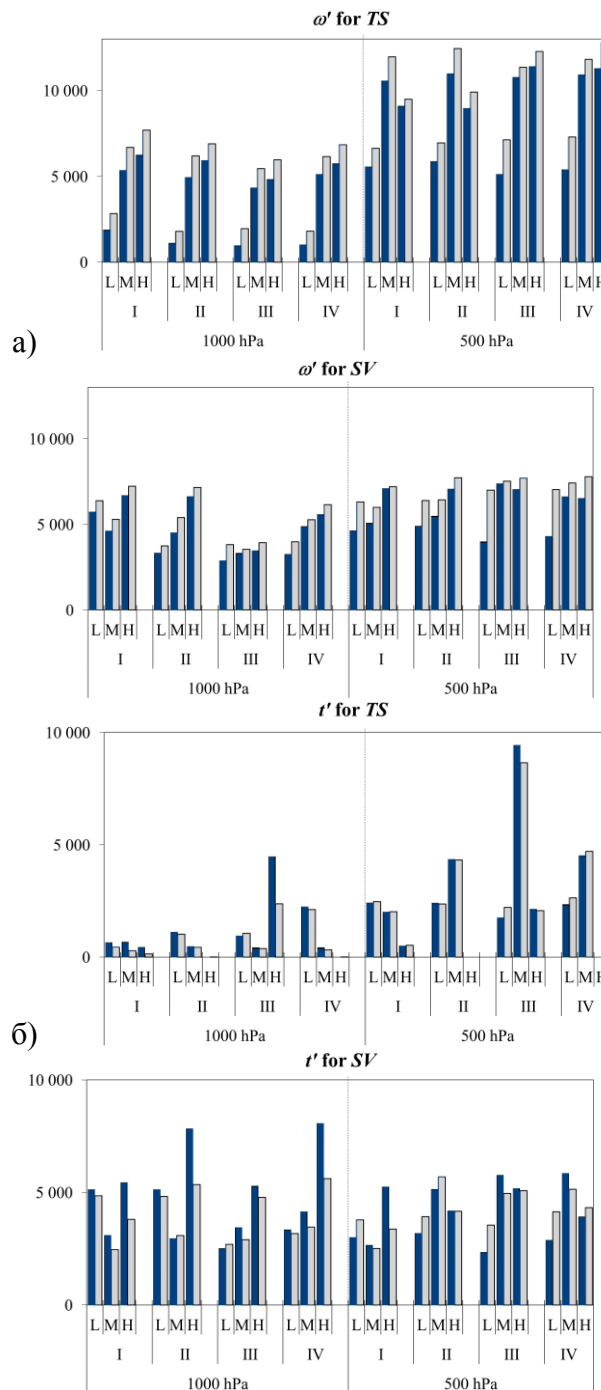


Рисунок 1. Количество аномалий  $\omega'$  (а) и  $t'$  (б) в широтных зонах Северного полушария (L – низкие широты, M – средние широты, H – высокие широты) за период 1979–2018 гг.: левая панель – TS, правая панель – SV; I – зима, II – весна, III – лето, IV – осень.

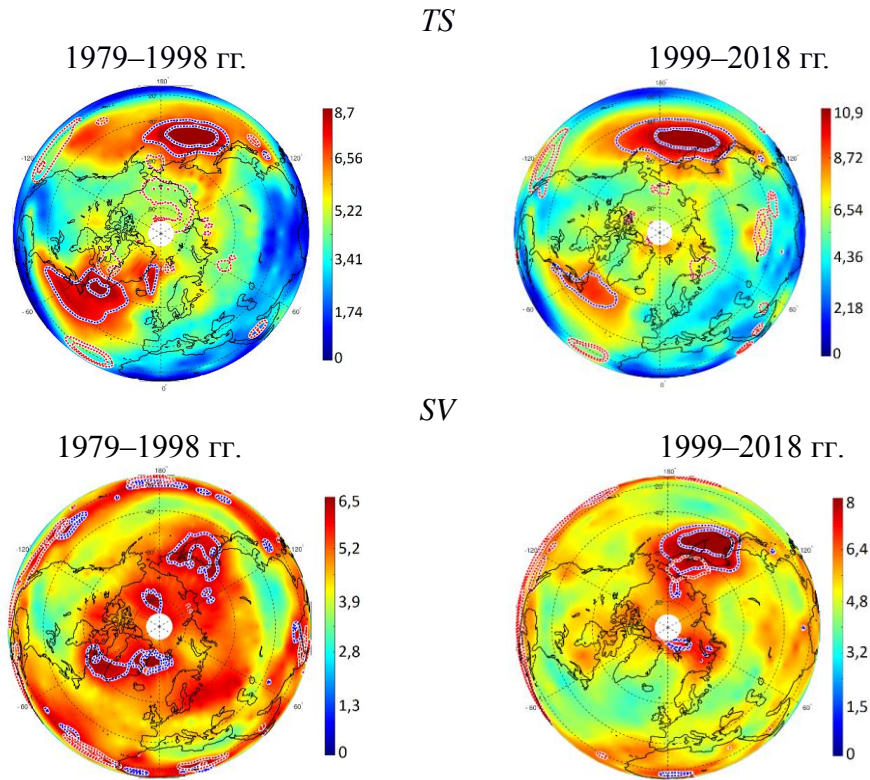


Рисунок 2. Пространственное распределение  $N(\omega')$  на 1000 гПа зимой для  $TS$  и  $SV$ . Красная пунктирная линия –  $N^+(\omega')$ , синяя пунктирная линия –  $N^-(\omega')$ .

Полученные результаты, особенно на фоне быстрого изменения климата, будут полезны при уточнении и тестировании численных моделей, которые также решают прогностические задачи в климатологии.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300154-1 и гранта РФФ № 21-71-10052, <https://rscf.ru/en/project/21-71-10052>.

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S., Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.

2. Hansen J., Sato M., Ruedy R. Perception of climate change // Proc. Nat. Acad. Sc. – 2012. – 109:2415–E2423.

3. Garfinkel C.I., Harnik N. The non-Gaussian and spatial asymmetry of temperature extremes relative to the storm track: The role of horizontal advection // J. Clim. – 2017. – 30:445–464.

4. Loikith P.C., Lintner B.R., Kim J., Lee H., Neelin J.D., Waliser D.E. Classifying reanalysis surface temperature probability density functions (PDFs) over North America with cluster analysis // Geophys. Res. Lett. – 2013. – 40:3710–3714.

5. Perron M., Sura P. Climatology of Non-Gaussian Atmospheric Statistics. // J. Clim. 2013. – 26:1063–1083.

6. Ruff T.W., Neelin J.D. Long tails in regional surface temperature probability distributions with implications for extremes under global warming // Geophys. Res. Lett. – 2012. – 39: L04704.

7. Loginov S.V., Eliseev A.V., Mokhov I.I. Impact of non-Gaussian statistics of atmospheric variables on extreme intramonth anomalies // Izv. Atmos. Ocean Phys. – 2017. – 53:269–278.

8. Feder E. Fractals, 2013. – Springer Science and Business Media, Berlin, p. 284.

## **ВИХРЕВАЯ ЦИРКУЛЯЦИЯ И ИЗМЕНЧИВОСТЬ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ РАЗНОГО ВРЕМЕННОГО МАСШТАБА НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

*Логинов С.В., Поднебесных Н.В.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
logSV13@imces.ru, podnebesnykhnv@inbox.ru

Приводятся результаты анализа изменчивости характеристик барических образований и основных метеовеличин, характеризующих состояние нижней тропосферы (1000 – 500гПа) Сибири (50-70°с.ш. и 60-110°в.д.). Проанализирована сезонная изменчивость самих величин, а также флуктуаций, соответствующих масштабам высокочастотной, синоптической и низкочастотной изменчивости.

Барические образования (БО) (циклоны –  $Z$  и антициклоны -  $Az$ ) и их перемещения по территории Сибири определялись методом мануального трекинга по приземным синоптическим картам и данным реанализа за 1976-2018 гг. В качестве характеристик БО использовались: количество БО (циклонов  $N_Z$  и антициклонов  $N_A$ ), давление в центре БО (циклона  $P_Z$  и антициклона  $P_A$ ) и продолжительность нахождения БО (циклона  $D_Z$ , антициклона  $D_A$ ) над территорией. Характеристики вихревой активности в регионе рассчитывались по параметрам БО, прошедших через регион за временной интервал (сезон или месяц): количество БО ( $N_Z$  и  $N_A$ ), давление ( $P_Z/N_Z$  и  $P_A/N_A$ ) и суммарная продолжительность нахождения БО на территории региона.

Для тропосферы Сибири на уровнях 1000гПа, 850гПа, 700гПа, 500гПа по срочным (6ч) данным реанализа Eca-5 рассчитывались основные метеорологические величины: температура ( $T$ ), влажность воздуха ( $q$ ), компоненты скорости ветра ( $u$ ,  $v$ ,  $\omega$ ), геопотенциала ( $\Phi$ ) и относительная завихренность ( $\zeta$ ). Вычисления проводились за интервал 1979-2019 гг.

Кроме того, из исходного ряда выделялись составляющие, связанные с известными масштабами изменчивости атмосферных процессов [1-3]: высокочастотной изменчивости (ВИ, менее 1,5 суток), связанной с влиянием топографии и местных вихрей; синоптической изменчивости (СИ) с масштабом соответствующим среднему периоду продолжительности жизни БО (2-7 суток) и низкочастотной изменчивости (НИ) с масштабом соответствующим блокирующим образованиям (10-30 суток).

Проведенный анализ динамики БО на территории Сибири показал, что количество как циклонов, так и антициклонов увеличилось, давление в центрах циклонов уменьшилось, т.е.  $Z$  стали более глубокими, а давление в центрах антициклонов выросло, т.е.  $Az$  стали более высокими, продолжительность нахождения БО в регионе уменьшилась, как по данным приземных синоптических карт, так и по данным реанализа. Полученные тенденции наиболее заметно выражены в 2012-2018 гг., что может говорить о неустойчивости атмосферы и, как следствие о нестабильности погоды в регионе в дыйный период [4].

Для предварительного анализа межгодовой изменчивости полученные величины усреднялись по территории Сибири.

Результаты анализа показали, что, особенности сезонного и вертикального распределения оценок флуктуаций выделяются статистически значимо для  $\{q, T, \Phi\}$  при  $\alpha=0.01$ , а для остальных метеовеличин значимы по уровню  $\alpha=0.05$ . Большим значениям среднеквадратических отклонений  $\sigma_{[T]}$  и  $\sigma_{[\Phi]}$  в зимний и осенний периоды соответствуют высо-

кие значения синоптической и низкочастотной изменчивости в эти же периоды, что указывают на существенную роль БО (циклонов и антициклонов, а также процессов блокирования) в изменчивости температуры.

Высокие значения диапазона изменчивости составляющих масштабов СИ и НИ по сравнению с масштабом ВИ для  $\{q, T, u, v, \Phi\}$  указывают на существенную роль масштабов СИ и НИ в процессах динамики атмосферы. В то же время для  $w$  и  $\zeta$  существенны процессы с масштабами ВИ и СИ. Данный вывод подтверждается результатами приведенными на рис.1, где коэффициенты линейного тренда  $k_{[w_{ВИ}]}$ ,  $k_{[w_{СИ}]}$  и  $k_{[\zeta_{ВИ}]}$ ,  $k_{[\zeta_{СИ}]}$  являются определяющими межгодовую и сезонную изменчивость.

На территории Сибири наблюдается асимметрия величины вихревых составляющих разного знака/направленности. Проявляется асимметрия преимущественно в исходных рядах, при этом, для:  $X \in \{v, w\}$  преобладание отрицательных значений, а для  $X \in \{u, \zeta\}$  - положительных. Значимой асимметрии в рядах, соответствующих масштабам ВИ, СИ и НИ не выявлено. Наличие асимметрии в исходных рядах может быть связано с нелинейным характером межгодовой изменчивости.

Статистически значимые оценки трендов на всех уровнях и во все сезоны года были получены только у  $[\zeta]$  - исходные величины и флуктуации масштабов ВИ и СИ. Оценки значимы для отрицательных и положительных составляющих одновременно. Для отдельных сезонов года, но на всех уровнях, были получены у  $[q]$  (весна и лето, ВИ),  $[v]$  (зима, ВИ),  $[w]$  (весна, исходные величины и ВИ) и  $[\Phi]$  (зима, ВИ). Тенденции изменчивости исходных величин, а также временных рядов СИ и НИ значимы, как правило, на некоторых уровнях в отдельные сезоны.

Статистически значимые корреляции ( $|r| > 0,5$ , и  $\alpha = 0,01$ ) для исходных величин отмечаются только по данным реанализа между давлением в центре циклонов и завихренностью  $P'_Z \cdot [\zeta']$  на геопотенциальной поверхности 1000гПа в осенний период, а также, между вертикальной составляющей ветра и суммарной продолжительностью антициклонов  $D'_A \cdot [w']$  и циклонов  $D'_Z \cdot [w']$  на 850гПа в весенний период. Знаком «'» обозначены аномалии, определяемые как отклонение величины от своего среднего многолетнего значения.

Наибольшее количество значимых корреляций между основными величинами, характеризующими состояние атмосферы и характеристиками мелкомасштабных БО приходится на масштаб ВИ. По данным синоптических карт значимы корреляции:  $D'_Z \cdot [T_{ВИ}']$ ,  $D'_A \cdot [T_{ВИ}']$  на 1000гПа в весенний период,  $D'_A \cdot [\zeta_{ВИ}']$  на 1000гПа в летний период и  $D'_Z \cdot [q_{ВИ}']$  на 850 и 1000гПа в осенний период. По данным реанализа значимы корреляции:  $D'_Z \cdot [u_{ВИ}']$ ,  $D'_Z \cdot [w_{ВИ}']$  на 850гПа,  $P'_A \cdot [q_{ВИ}']$  - на 850гПа в летний период,  $D'_A \cdot [w_{ВИ}']$  на 1000гПа в осенний период.

Из результатов анализа следует, что, статистически значимая линейная связь часто проявляется между флуктуациями характеристик атмосферы ВИ-масштаба и суммарной продолжительностью БО.

Для БО продолжительностью от двух до семи суток (масштаб СИ) также отмечается значимая корреляция. По данным синоптических карт значимы  $D'_A \cdot [T_{СИ}']$ ,  $D'_A \cdot [v_{СИ}']$ ,  $D'_A \cdot [\zeta_{СИ}']$  и  $D'_Z \cdot [w_{СИ}']$  на 1000гПа в летний период. А по данным реанализа значима  $D'_Z \cdot [w_{СИ}']$  на 850гПа в весенний период.

Для БО продолжительностью от девяти до тридцати суток (масштаб НИ) по данным синоптических карт отмечается значимая корреляция  $P'_A \cdot [T_{НИ}']$  на 850 и 1000гПа в весенний период, а по данным реанализа -  $D'_Z \cdot [\zeta_{НИ}']$  на 1000гПа в весенний период.

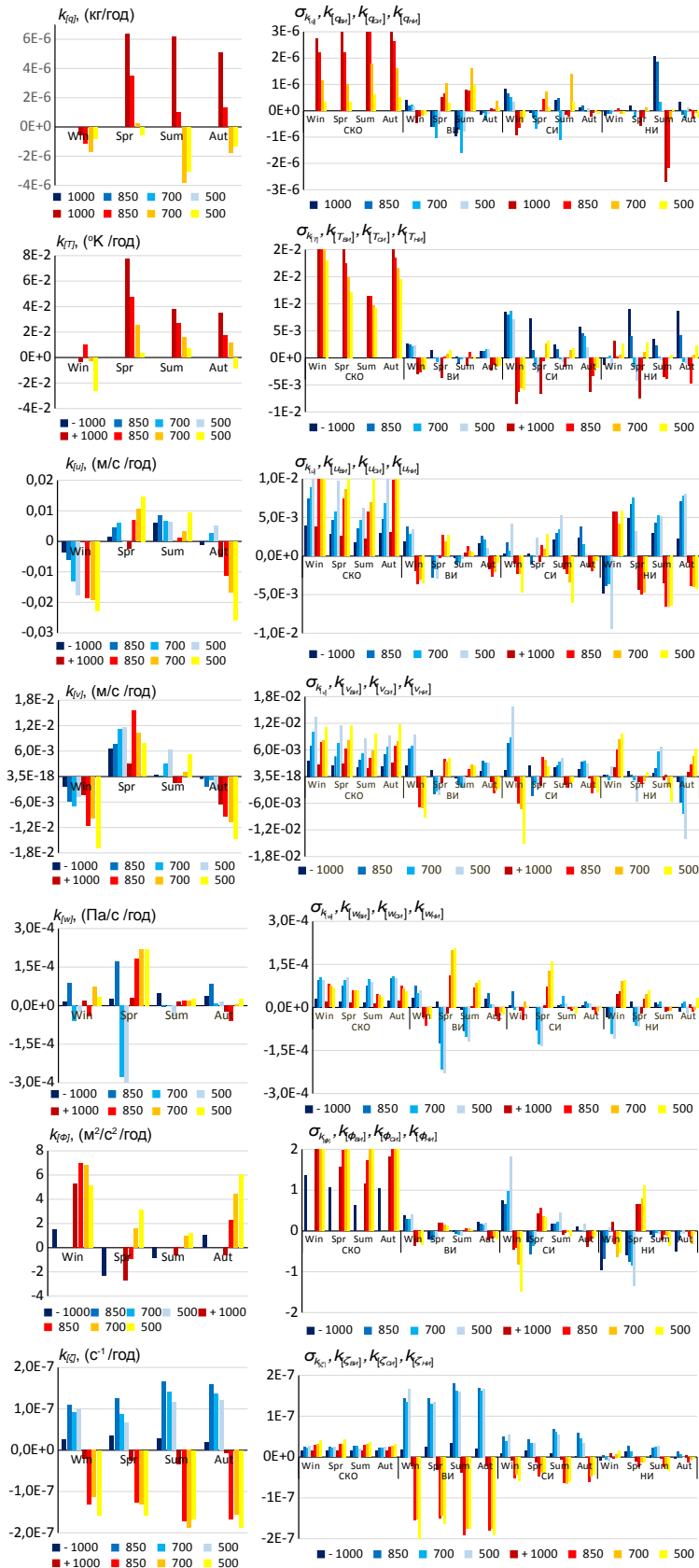


Рисунок 1. Коэффициенты линейного тренда величин  $[X]$  по сезонам в нижней тропосфере. Левая панель – исходные (не фильтрованные) величины, правая панель –  $\sigma_{[X]}$  и  $[X_{ви}], [X_{си}], [X_{ни}]$ .

Особенности пространственного распределения корреляций представлены в таблице 1, где приведено количество случаев ( $\leq 7$ ) с высокой корреляцией ( $>0.7$ ) между исходными рядами метеовеличин и их вихревыми составляющими масштабов ВИ, СИ и НИ в тропосфере Сибири в разные сезоны года. Результаты показывают, что статистически значимая коррелированность ( $\alpha=0.05$ ) проявляется в слое тропосферы (1000÷500гПа с максимальными значениями на 850гПа).

**Таблица 1. Количество случаев высокой корреляции ( $>0.7$ ) характеристик БО с метеовеличинами в нижней тропосфере региона в разные сезоны года.**

	С	СЗ	З	ЮЗ	Ю	ЮВ	В	СВ	центр
Зима									
Исх	3/-/-	2/2/-	4/-/-	3/2/-	3/2/1-	2/2/1/1	1/-/-	2/-/-	2/-/-
ВИ	1/-/-	-/-/1	2/-/1	-/-/-	2/2/-	3/2/-	1/1/1-	-/-/-	-/2/1
СИ	1/-/-	1/-/-	1/1/1	1/-/1-	1/-/1/1	2/2/1/1	1/1/1-	-/-/-	-1/-
НИ	1-/1/1	-/-/-	1/1/1	1/1/1-	1/2/1/1	1/-/-	-/-/-	1/-/-	3/1/2/1
Весна									
Исх	2/2/1-	2/1/-	2/1/1/1	1/2/2/2	2/4/3/1	4/3/1/1	1/1/1/1	2/1/1/1	1/1/1/1
ВИ	3/1/-	1/1/1/1	4/6/5/5	6/6/6/6	7/7/5/2	4/6/3/1	4/4/4/3	1/1/1-	6/4/4/1
СИ	1-/1/2	2/1/2/1	0/1/2/2	1/3/3/2	1/2/1/1	3/2/-/1	-/1/1/1	2/2/2/2	-/1/1/1
НИ	2/1/-	3/1/1/1	1/1/1/1	1/1/-	1/1/1/1	1/1/-	2/1/1-	-/-/1	-/-/-
Лето									
Исх	1/-/-	1/1/-	3/1/-/1	3/1/2/1	4/3/6/4	3/5/3/2	1/1/1-	-/1/-	1/2/1/1
ВИ	1/-/-	2/1/-	3/1/1/1	1/2/-	4/6/4/4	3/2/1-	2/2/-	1/1/-/1	1/1/-
СИ	1/-/-	1/-/-	2/1/1/1	2/2/1/1	2/2/1/2	2/-/2/1	1/1/-	1/-/1-	2/-/1
НИ	-/-/-	2/-/-	1-/1/1	1/1/1/2	1/1/-	1/-/-	2/-/2/1	2/1/-	2/1/-/1
Осень									
Исх	2/-/-	1/1/1/1	1-/1/1	3-/1/-	2/3/-/1	3/2/2/1	3/1/-	2/-/-	1/1/1/1
ВИ	1/-/-	-/-/-	1-/2/-	-/-/-	2/2/1-	1/-/-	-/-/-	-/-/-	1/-/1
СИ	1/-/-	-/2/2/1	1/1/1/1	1/-/-	1/2/-/1	1/1/-	1/-/-	1/-/-	-/-/1
НИ	1/-/-	1-/1/-	2-/1/1	3/1/1/1	3/2/2/1	2/2/-	1/1/1-	2/-/-	1/1/1/1

*Примечание:* обозначение областей Сибири: С – северная, СЗ – северо-западная, З – западная, ЮЗ – юго-западная, Ю – южная, ЮВ – юго-восточная, В – восточная, СВ – северо-восточная, центр – центральная; 1000/850/700/500гПа – уровни высоты; Исх – (исходные ряды) и ВИ, СИ, НИ – масштабы изменчивости атмосферных процессов (высокочастотная, синоптическая и низкочастотная).

Таким образом, получены оценки связи вихревых процессов в тропосфере Сибири с изменчивостью флуктуаций основных метеорологических величин. Показано, что для большинства величин значимые корреляции ( $>0.7$ ) проявляется, преимущественно, весной и летом для изменчивости высокочастотного и синоптического масштабов.

1. Blackmon M.L., Lee Y-H., Wallace J.M. Horizontal structure of 500 mb height fluctuations with long, intermediate and short time scales // J. Atmos. Sci. 1984. V. 41. № 6. P. 961–980.
2. Farrell B.F. The initial growth of disturbances in a baroclinic flow // J. Atmos. Sci. 1982. V. 39. № 8. P. 1663–1686.
3. Логинов С.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние негауссовой статистики атмосферных переменных на экстремальные внутримесячные аномалии // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 307-317.
4. Podnebesnykh N.V. Variability of climatic characteristics and their relationship to large-scale atmospheric circulation over Siberia // Geography and Natural Resources. 2022. Vol. 46. № 4. pp 371-377.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ СИБИРСКОГО РЕГИОНА

*Ломакина Н.Я., Лавриненко А.В.*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г.Томск, lnya@iao.ru

Важную роль в формировании климата играет водяной пар, как главный парниковый газ [1, 2], оказывающий значительное влияние на тепловой баланс земной атмосферы. Водяной пар удерживает тепло в приземном слое при поглощении уходящей от земной поверхности длинноволновой радиации в инфракрасном диапазоне. В условиях наблюдаемого глобального потепления должно наблюдаться увеличение влажности воздуха в связи с достаточно тесной ее корреляционной связью с температурой воздуха [3]. Оценка трендов водяного пара имеет большое значение, как на глобальном, так и на региональном уровнях, и особенно, в пограничном слое атмосферы (ПСА), на который приходится половина его содержания [4]. Данные о содержании влаги в атмосфере и тенденциях ее изменения необходимы для решения проблем климатологии, метеорологии и экологии.

Настоящая работа продолжает исследования [3], при этом ряд наблюдений увеличился на 10 лет. Целью работы является оценка вклада последнего десятилетия (2011–2020 гг.) в изменения среднегодового содержания водяного пара, а также уточнение сезонных различий долговременных изменений влажности воздуха в ПСА Сибири с учетом новых данных, полученных за последнее десятилетие.

Анализ долгопериодных изменений влажности воздуха в пограничном слое атмосферы Сибирского региона был проведен для осредненных посезонно и в целом за год значений массовой доли водяного пара на четырех высотных уровнях: 0 (уровень земной поверхности), 400, 800 и 1600 м. В качестве статистических характеристик были использованы среднегодовые (среднесезонные) аномалии массовой доли водяного пара  $\Delta\bar{q} = \bar{q}_i - \bar{q}$  (здесь  $\bar{q}_i$  – среднегодовые (среднесезонные) значения  $i$ -го года, а  $\bar{q}$  – соответствующая норма в ‰, полученная для базового периода). В качестве базового периода взяты 1973–1980 гг., когда на территории северного полушария, согласно [5], не наблюдались какие-либо значимые изменения среднегодовой температуры. Для исследования тенденций межгодовых изменений среднегодовых (среднесезонных) аномалий влажности воздуха использованы линейные тренды изменения осредненной за год (сезон) массовой доли водяного пара (‰/10 лет) в целом за последние 40 лет (1981–2020 гг.) и за последнее десятилетие (2011–2020 гг.). Для наглядности были построены карты пространственного распределения коэффициентов линейных трендов аномалий среднегодовой и среднесезонной массовой доли водяного пара для четырех высотных уровней ПСА: 0 (уровень земной поверхности), 400, 800 и 1600 м.

Рассмотрим сорокалетние изменения аномалий содержания водяного пара в пограничном слое атмосферы Сибири. На рис.1 представлено пространственное распределение коэффициентов линейных трендов аномалий среднегодовых значений содержания водяного пара на четырех уровнях ПСА над территорией Сибири за период 1981–2020 гг.

Анализ долговременных изменений влажности воздуха в пограничном слое атмосферы Сибирского региона за последние 40 лет с 1981 по 2020 гг. показал, характер распределения по пространству линейных трендов аномалий среднегодовой массовой доли водяного пара является неоднородным и отличается от пространственного распределе-

ния трендов среднегодовой температуры воздуха [6], для которой характерны их положительные значения во всем ПСА Сибирского региона. Положительные тренды среднегодового содержания водяного пара наблюдаются на всей территории Сибири на уровне земной поверхности. При этом максимальные значения отмечаются на большей части Западной Сибири: севернее  $65^{\circ}$  с.ш. и на ее юго-востоке, а также частично в Восточной Сибири: в области Енисейского бассейна, в северных районах Байкала и на северо-востоке территории.

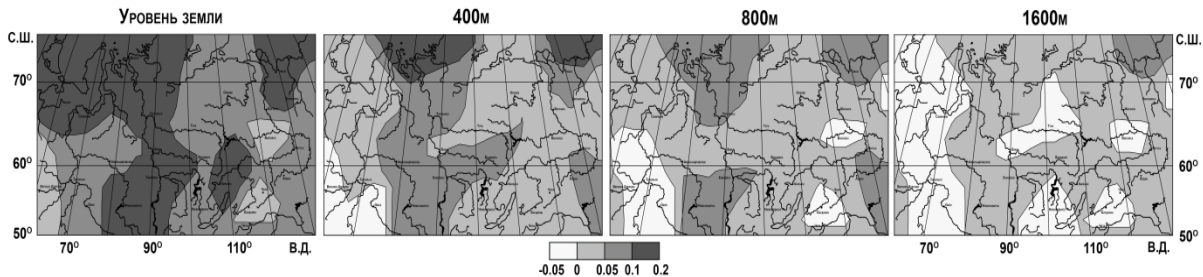


Рисунок 1. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов аномалий среднегодовой массовой доли водяного пара ( $\text{‰}/10$  лет) в пограничном слое атмосферы Сибирского региона

На уровне 400 м максимальные тренды среднегодовой влажности, как и среднегодовой температуры, наблюдаются в полярных районах. В отличие от температуры на юго-западе региона прослеживается область слабых отрицательных трендов аномалий содержания водяного пара.

Величина тренда среднегодовых аномалий массовой доли водяного пара, как и температуры воздуха, убывает с высотой. Но, в отличие от среднегодовой температуры, для которой характерны положительные тренды во всем ПСА, отрицательные тренды влажности преобладают на уровне 1600 м на территории Западной Сибири западнее  $75^{\circ}$ – $80^{\circ}$  в.д. и частично наблюдаются в субполярных и умеренных районах Восточной Сибири.

На рис. 2 представлено пространственное распределение коэффициентов линейных трендов аномалий среднесезонных значений содержания водяного пара на четырех уровнях ПСА над территорией Сибири за период с 1981 по 2020.

Анализ долговременных изменений влажности воздуха в пограничном слое атмосферы Сибирского региона за последние 40 лет с 1981 по 2020 гг. (Рис. 1) показал, что характер распределения линейных трендов аномалий среднесезонной массовой доли водяного пара является неоднородным по пространству, зависит от сезона, и в основном аналогичен распределению трендов среднесезонной температуры [6], но с некоторыми отличиями.

В полярных районах Западной Сибири во все сезоны наблюдаются положительные тренды среднесезонной влажности воздуха.

Зимой слабые отрицательные тренды аномалий среднесезонной влажности воздуха ( $0,01$ – $0,05\text{‰}/10$  лет) преобладают на уровне земной поверхности на территории всего региона. В то же время в полярной зоне Западной Сибири и на её юго-востоке наблюдаются слабые положительные тренды ( $0,01$ – $0,06\text{‰}/10$  лет), область распространения которых с увеличением высоты распространяется на всю Западную Сибирь и прилегающие районы Восточной Сибири до  $100^{\circ}$  в.д.



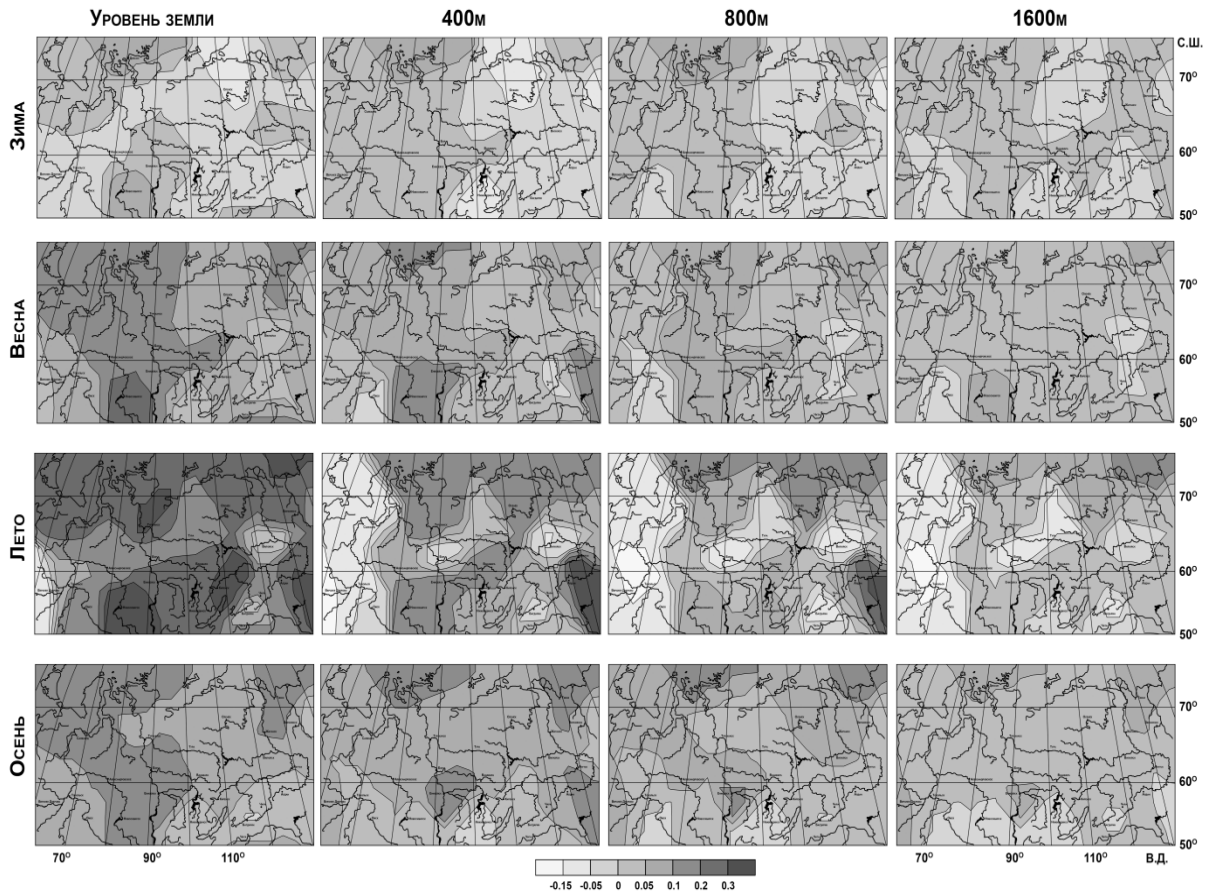


Рисунок 2. Пространственное распределение коэффициентов линейных трендов аномалий среднесезонной массовой доли водяного пара (‰/10 лет) в ПСА Сибирского региона.

Для лета характерны максимальные положительные тренды влажности воздуха, наблюдающиеся на уровне земной поверхности на большей части территории Сибирского региона за исключением крайнего юго-запада, где прослеживается область отрицательных трендов содержания влаги. Величины коэффициентов положительных трендов и область их распространения уменьшаются с высотой. С уровня 400 м зона отрицательных трендов увеличивается и охватывает западную половину Западной Сибири, а также частично центральные и южные районы Восточной Сибири.

Весной и осенью в ПСА региона преобладают положительные тренды влажности воздуха. Наибольшие значения трендов массовой доли водяного пара наблюдаются на уровне земной поверхности в полярных широтах всего региона, а также на территории Западной Сибири. Величина тренда убывает с высотой.

Анализ сезонных трендов аномалий массовой доли водяного пара показал, что на уровне земной поверхности наибольший вклад в увеличение среднегодовой влажности воздуха Сибирского региона вносит летний сезон, в меньшей степени – весна и осень. На высотах ПСА лето вносит максимальный вклад в полярных широтах Восточной Сибири, а на остальной территории Сибири – осень и весна.

Наряду с исследованием сорокалетних изменений среднегодовой влажности воздуха была проведена оценка вклада последнего десятилетия (2011–2020 гг.) в ее изменения в пограничном слое атмосферы над территорией Сибирского региона. За период 1981–2020 гг. по сравнению с 1981–2010 гг. усилилось не только потепление погранич-

ного слоя атмосферы Сибири [6], но и его влагосодержание. Наиболее ярко это проявляется в полярных и субполярных районах Западной Сибири, а также в умеренной зоне Восточной Сибири. На остальной территории Восточной Сибири коэффициенты линейных трендов среднегодовой влажности слабо возросли либо не изменились, за исключением центральных районов Якутии (ст. Верхоянск и Якутск), где их величина за 40-летний период уменьшилась по сравнению с 1981–2010 гг.

Сравнительный анализ коэффициентов трендов среднесезонной влажности за (1981–2020) и ранее исследуемый 30-летний период (1981–2010) показал, что процесс увеличения влажности воздуха в ПСА за 40-летний период протекает более интенсивно на всей территории Западной Сибири зимой, весной и летом. Осенью рост содержания влаги здесь усилился к северу от 65 параллели, а к югу от неё наблюдаются либо незначительные изменения влажности, либо замедление её роста. В Восточной Сибири усиление процесса увлажнения происходит в полярных районах во все сезоны, в субполярных – зимой и весной, а в умеренных – весной. Летом в субполярной и умеренной зонах Восточной Сибири наблюдается замедление процесса увлажнения пограничного слоя атмосферы.

Таким образом, анализ долговременных изменений среднегодовой и среднесезонной влажности в пограничном слое атмосферы Сибири за период 1981–2020 гг. показал следующие результаты.

Изменения среднегодового содержания водяного пара не всегда соответствует изменению среднегодовой температуры, особенно на уровне 1600 м., где в отдельных районах на фоне положительных трендов температуры наблюдаются отрицательные тренды влажности.

Положительные тренды среднесезонной доли массовой доли водяного пара преобладают по всей территории и во все сезоны с некоторым исключением. Отрицательные тренды наблюдаются в умеренной зоне Западной Сибири зимой (у земной поверхности) и летом (но только на высотах пограничного слоя атмосферы). Также отрицательные тренды влажности воздуха прослеживаются в субполярных и умеренных широтах Восточной Сибири зимой.

Наибольший вклад в увеличение среднегодовой влажности воздуха на уровне земной поверхности вносит летний сезон и в меньшей степени – весна и осень. На высотах ПСА лето вносит максимальный вклад в полярной зоне Восточной Сибири, весна и осень – на остальной территории Сибирского региона.

В среднем за год влагосодержание ПСА усилилось за период 1981–2020 гг. по сравнению с 1981–2010 гг. почти на всей территории региона, за исключением центральных районов Восточной Сибири, где наблюдается замедление роста влажности воздуха.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Кондратьев К.Я., Грассель Х. Изменения глобального климата в контексте глобальной экодинамики. Спб.: Санкт-Петербургский Научно-исследовательский Центр экологической безопасности РАН, 1993. 195 с.

2. Исаев А.А. Экологическая климатология. М.: Научный мир, 2001. 458 с.

3. Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Ильин С.Н., Лавриненко С.Н. Современные изменения климата пограничного слоя атмосферы над территорией Сибирского региона / Под ред. Матвиенко Г.Г. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2013. 212 с.

4. Хромов С.П., Петросянц М.А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, изд-во «Колос-С», 2001. 582 с.

5. Переведенцев Ю.П. Теория климата. Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2009. 504 с.

6. Lomakina N.Ya. and Lavrinenko A.V. Modern Trends of Temperature of the Atmospheric Boundary Layer over Siberia // Atmospheric and Oceanic Optics. 2022. V. 35. No. 04. pp. 378–386.

## ПРОГНОЗ КОНВЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ ХОЛОДНОГО ПЕРИОДА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ

*Лукиша М.В.*

Белорусский государственный университет, Белгидромет,  
Республика Беларусь, г. Минск, maril2020@mail.ru

Прогноз таких конвективных явлений, как грозы, интенсивные ливневые осадки и шквалистый ветер, в холодный период года является важной проблемой, с которой все чаще сталкиваются синоптики в процессе своей оперативной деятельности. Она становится особенно актуальной в условиях современного периода глобального потепления климата, выражающегося в первую очередь в росте зимних температур.

Чаще рассматриваемые опасные метеорологические явления отмечаются в результате процессов фронтальной или внутримассовой конвекции в теплый период года (с апреля по октябрь). В холодный период года (с ноября по март) данные опасные метеорологические явления, особенно зимние грозы, встречаются значительно реже, поэтому изучены недостаточно как с точки зрения их формирования, так и географического проявления на территории нашей страны и за рубежом.

Согласно литературе, к зимним, или снеговым грозам относят грозы, при которых вместо ливневого дождя выпадает ливневый снег, ледяной дождь или ледяная/снежная крупа. В условиях изменяющегося климата в сторону потепления отмечается тенденция к увеличению количества гроз в холодный период года с ноября по март, часто сопровождающимся ливневыми осадками в жидком виде [1].

Кроме этого, они способны наносить серьезный экономический ущерб не только отдельным территориям, но и стране в целом, а также создавать угрозу жизни и здоровью населения.

Их повторяемость определяется синоптической ситуацией, а также свойствами подстилающей поверхности. Поэтому целью данного исследования стал анализ повторяемости зимних гроз (ноябрь-март) по территории Минской области Республики Беларусь (РБ) за последние 34 года (1989-2022 гг.), а также сопровождающих их явлений и определение их связей с приземной метеорологической и высотной аэрологической ситуацией, которые могут рассматриваться в качестве основных синоптических рекомендаций по прогнозированию опасных конвективных явлений в холодный период года на территории Беларуси.

Выбор 1989 года в качестве начала выборки сделан неслучайно, так как именно с этого года, на территории Беларуси начался самый продолжительный период потепления за все время инструментальных наблюдений на протяжении последних 130 лет (среднегодовая температура в стране выросла на 1,2°C за последние 30 лет) [2,3]. Также стоит отметить, что отмечается особенно резкое повышение зимних температур, так, например, согласно данным Белгидромета температура в период декабрь 2021 г. – февраль 2022 г. составила -1,8°C, что на 1,6°C выше климатической нормы.

На основании анализа архивных данных метеорологических станций (МС) и авиационных метеорологических станций гражданских (АМСГ) Минской области РБ было обнаружено, что за последние 34 года на территории области был отмечен 61 случай с зимними грозами: 17 на МС Минск, 9 на АМСГ Минск-2, 7 на МС Березино, 6 на МС Воложин, 6 на МС М.Горка, 4 на МС Столбцы, 4 на МС Вилейка, 3 на МС Нарочь, 3 на МС Слуцк и 2 на МС Борисов (рис. 1).

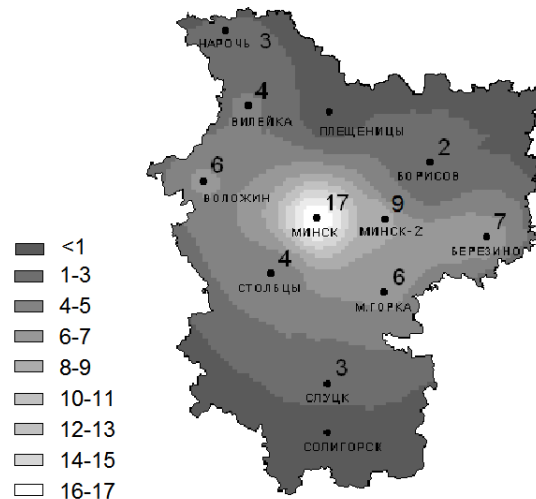


Рисунок 1. Распределение зимних гроз на территории Минской области за холодный период 1989-2022 гг.

Из территориального распределения зимних гроз видно, что большинство из них наблюдалось в столичном регионе Минской области, в частности вблизи города Минска. Это связано с тем, что крупные города являются дополнительными источниками тепла, которые способствуют обострению атмосферных фронтов и более интенсивному развитию конвективных процессов.

Также наблюдается неравномерное распределение гроз в течение холодного периода года: 3 в январе, 15 в феврале, 38 в марте, 3 в ноябре, 2 в декабре. Наибольшее количество гроз в марте может быть обусловлено высокими температурами воздуха в начале весны. Поверхность земли еще не успевает прогреться, возникает разница температур в воздушных массах, что приводит к восходящим токам воздуха, к тому же насыщенным влагой, что в свою очередь является причиной образования гроз.

К тому же анализ данных показал, что не наблюдается тенденции увеличения данного ОЯ в последние десятилетия. Так, например, в холодный период года с 1989 по 2000 гг. было отмечено 35 случаев гроз на территории Минской области, а в период с 2001 по 2022 гг. – 26 случаев.

При этом грозы имели продолжительность от нескольких минут до 1,5 ч. В большинстве случаев продолжительность данного метеорологического явления составляла до 30 минут, так как конвективная деятельность носит локальный, непродолжительный и резко меняющийся интенсивность характер.

Все случаи зимних гроз, зафиксированные метеостанциями Минской области РБ, носили фронтальный характер и были связаны с прохождением активных атмосферных фронтов. При этом 16 гроз отмечалось на холодном фронте с волнами, 16 – на основном холодном фронте, 5 – на вторичном холодном фронте, 13 – на фронте окклюзии по типу теплого, 11 – на фронте окклюзии по типу холодного (рис.2). Атмосферные фронты были связаны с ложбинами циклонов различных траекторий: западных (22 случая), северных (17 случаев), ныряющих (18 случаев) и южных (4 случая). Западные, северные и ныряющие циклоны имели глубокие ложбины, вытянутые с севера на юг, и проходили через территорию Минской области, как правило, в стадии молодого циклона или максимального развития (давление в центре от 945 гПа до 998 гПа). Южные циклоны с ложбинами, ориентированными с юго-запада на север или северо-восток, проходили через описываемые районы в основном в стадии максимального развития или заполнения (давление в центре циклонов – 998-1006 гПа).

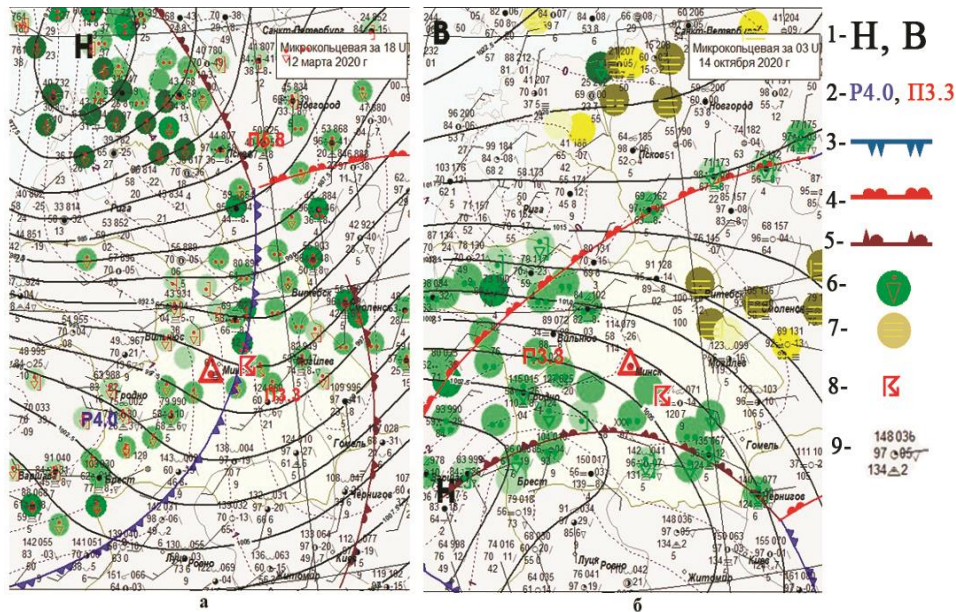


Рисунок 2. Приземные синоптические ситуации, при которых наблюдались зимние грозы в 2020 г.: а – холодный фронт; б – фронт окклюзии по типу теплого. Условные обозначения: 1 – центры низкого и высокого давления, 2 – барическая тенденция роста и падения давления, 3 – холодный фронт, 4 – теплый фронт, 5 – фронт окклюзии, 6 – ливневые осадки, 7 – туманы, 8 – грозы, 9 – приземная наноска в коде КН-01.

В результате прохождения атмосферных фронтов, с которыми были связаны грозы в Минской области, были выявлены следующие изменения метеорологических параметров у земли и на высоте.

Ветер, как правило, менял свое направление с южного, юго-восточного в случае фронта окклюзии и с юго-западного на западное, северо-западное в случае холодного фронта. При этом наблюдалось усиление скорости ветра после прохождения атмосферных фронтов, с которыми были связаны грозы в холодный период года. Максимальные порывы в основном не превышали 15-20 м/с. В М.Горке 5 февраля 1999г. был зарегистрирован порыв 21 м/с, в аэропорту Минск-2 12 марта 2020 года 24 м/с, а в Слуцке 18 ноября 2004 года максимальный порыв ветра составил 30 м/с, что соответствует критерию опасного гидрометеорологического явления.

Практически во всех случаях перед прохождением атмосферных фронтов отмечалась тенденция падения давления, которая сменялась тенденцией роста.

Температуры воздуха, при которых развивались грозы в холодный период года на территории Минской области, были, как правило слабopоложительными и колебались в диапазоне от -1,4 до +5,9°C (исключение случай 18.02.1996, МС Минск -14,3°C).

Все случаи зимних гроз сопровождалось осадками в виде ливневого дождя в случае положительных температур, ливневого дождя со снегом в случае температур близких к 0°C или ливневого снега в случае близких к 0°C или отрицательных температур. При этом более значительное ухудшение видимости наблюдалось в осадках твердого характера (до 100 м), что связано с размерами снежинок, их отражательной и рассеивающей способностью. Количество выпавших атмосферных осадков в основном не превышало 5-6 мм.

Поскольку на территорию Минской области в период с ноября по март поступали теплые воздушные массы атлантического или средиземноморского происхождения, то

это способствовало созданию вертикальных температурных градиентов больше влажно-адиабатических и развитию неустойчивой стратификации атмосферы, которая является причиной образования конвективной облачности и, как следствие, развития зимних гроз. Кучево-дождевые облака, как правило, имели нижнюю границу (уровень конденсации) порядка 300-600 м, а верхнюю границу (уровень конвекции) около 2000-4000 м в зависимости от температурного фона.

На уровне изобарической поверхности АТ-850 практически во всех случаях отмечался гребень теплого и влажного воздуха, который затем менялся ложбиной холода. Диапазон температур на данном изобарическом уровне составил от  $-7,0$  до  $+6,5^{\circ}\text{C}$  в зависимости от господствующей воздушной массы, а диапазон дефицитов точки росы – от 0 до  $6^{\circ}\text{C}$ .

На уровне изобарической поверхности АТ-700 наблюдалось усиление южного и юго-западного ветра до критериев струйного течения ( $100$  км/ч и более), на уровне изобарической поверхности АТ-500 – усиление ветра западной составляющей до  $160-200$  км/ч, а на уровне изобарической поверхности АТ-300 – до  $200-260$  км/ч.

В результате анализа приземных метеорологических и высотных аэрологических условий формирования зимних гроз на территории Минской области с ноября по март 1989-2022 гг. были сформированы следующие синоптические рекомендации к прогнозу конвективных явлений в холодный период года:

- поступление теплой (с температурой воздуха у земли выше  $0^{\circ}\text{C}$ ) и влажной воздушной массы с юга или юго-запада, связанное с выходом глубоких западных, северных, ныряющих или южных циклонов в стадии молодого циклона, максимального развития или заполнения;

- прохождение основных и вторичных активных холодных фронтов, холодных фронтов с волнами и фронтов окклюзии, обеспечивающих подъем теплого и влажного воздуха в нижней тропосфере;

- существование слоя конвективной неустойчивости в атмосфере, характеризующейся вертикальными градиентами температуры значительно больше влажноадиабатических;

- наличие гребня теплого и влажного воздуха на уровне АТ-850;

- наличие низкоструйных течений АТ-700 и АТ-500 и мощного струйного течения западной четверти на уровне АТ-300, усиливающего конвективные процессы.

1. Лукша М.В. Научное обоснование прогноза конвективных явлений холодного периода на примере аэродрома Минск-2. – Минск: БГУ, 2022. – 60 с.

2. Подгорная, Е.В. Особенности изменения климата Республики Беларусь за последние десятилетия / Е.В. Подгорная, В.И. Мельник, Е.В. Комаровская. – Минск: Белгидромет, 2015. – 120 с.

3. Логинов В.Ф., Бровка Ю.А., Микуцкий В.С. Изменение климата, экстремальных погодных и климатических явлений и их связь с типами циркуляции атмосферы Северного полушария по Б.Л. Дзерdzeевскому / В.Ф. Логинов, Ю.А. Бровка, В.С. Микуцкий // Природопользование. – 2013. – № 24. – С. 5-11.

## ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

*Максютова Е.В., Башалханова Л.Б.*

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, emaksyutova@irigs.irk.ru,  
ldm@irigs.irk.ru

В современных условиях меняющегося климата остро встает проблема адаптации к происходящим изменениям. Распоряжением Правительства утвержден Национальный план мероприятий адаптации к изменениям климата [1] и проводится поэтапная его разработка по регионам Российской Федерации. Для определения оперативных и долгосрочных мер по адаптации с целью уменьшения уязвимости субъектов экономической деятельности и граждан Иркутской области необходимо выявление и оценка климатических рисков по уровням опасности [2].

В данной работе нами рассматриваются опасные природные процессы, которые относятся к метеорологическим явлениям и вносят существенные коррективы на хозяйственную деятельность. В целом условия возникновения и развития опасных атмосферных явлений тесно связаны с особенностями географического положения, неоднородностью рельефа и синоптическими условиями приходящих воздушных масс [30].

Согласно градации источников климатических рисков для объектов системы МЧС России по интенсивности, распространенности и продолжительности воздействия выделены уровни опасности: катастрофический, весьма опасный, опасный, умеренно-опасный [3].

По уровню опасности для 33 муниципальных образований (МО) Иркутской области оценивались следующие основные атмосферные явления: сильный ветер (в том числе шквал), жара, засуха, заморозки, град, сильные атмосферные осадки, пожарная опасность в лесах, мороз (минимальная температура воздуха ниже минус 30°C).

В качестве источников информации использовались Государственные доклады [4], данные наблюдений [5], справочники [6].

На территории Иркутской области по уровню опасности выделяется сильный ветер, в том числе шквал (рисунок 1). Катастрофический ветер характерен для 9 муниципальных образований области: Катангский, Ольхонский, Тайшетский, Эхирит-Булагатский, Аларский, Заларинский, Зиминский, Усольский, Черемховский.

Почти ежегодно наиболее опасные сильные ветры со средней скоростью не менее 20 м/с и шквалистым усилением скорости более 25 м/с отмечаются на всей территории Иркутской области, чаще весной и осенью. Весьма опасное (28,5-32,6 м/с) и чрезвычайно опасное (более 32,7 м/с) превышение скорости ветра преимущественно приурочено к долинам крупных рек, остепненным участкам, побережью оз. Байкал (более 35 м/с). Осенний максимум очень сильных ветров на побережье оз. Байкал сдвинут на ноябрь-декабрь. Здесь скорости ветра при шквалах могут превышать 40 м/с. Штормовые осенние ветры на побережье Байкала мешают становлению зимнего ледяного покрова озера, взламывают молодой лед, формируют районы концентрации рапаков и торосов.



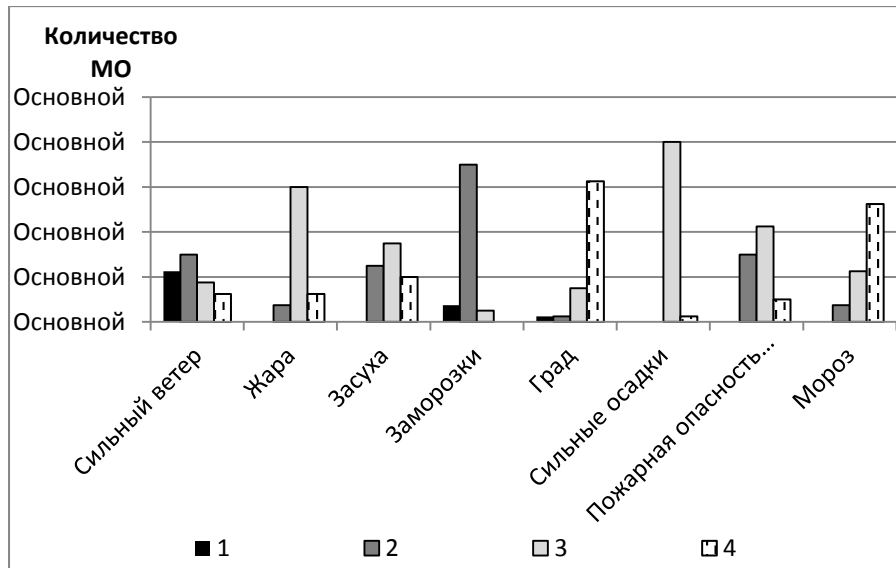


Рисунок 1. Опасные метеорологические явления на территории Иркутской области: 1 – катастрофический, 2 – весьма опасный, 3 - опасный, 4 - умеренно опасный.

Среднее число дней со скоростью ветра более 20 м/с наибольшее в Тайшете (30,6), на Иркутско-Черемховской равнине и долинах рек на севере области колеблется от 10 до 20 дней, на остальной территории – менее 10 дней [6]. На западном побережье оз. Байкал число таких дней изменяется от 24,1 в Большом Голоустном до 73 на Солнечной. Число дней со скоростью ветра более 30 м/с – от 1,5 до 24 соответственно. На метеостанции Солнечная до 12 дней возможны ветры со скоростью более 40 м/с.

По агроклиматическим условиям Иркутская область относится к зоне рискованного земледелия из-за большой вероятности заморозков - на большей части это весьма опасный уровень а для отдельных районов он достигает катастрофического: Усть-Удинский, Шелеховский, Эхирит-Булагатский.

Большой ущерб посевным площадям наносят поздние весенние, летние и ранние осенние заморозки. Средняя дата прекращения заморозков в воздухе весной колеблется по территории в зависимости от местоположения от 22 мая до 25 июня. Первые осенние заморозки начинаются 15-25 августа на севере и повсеместно на дне узких долин, падей, котловин, в конце августа – начале сентября на большей части территории, 5-15 сентября на возвышенных участках рельефа. Число дней с заморозками в области составляет 10-21 в мае, 1-3 – в июне. В зависимости от местоположения (плоский водораздел, верхняя часть склона, побережья крупных рек, водохранилищ, нижняя часть склона, узкие долины) снижается продолжительность периода без заморозков с ростом их интенсивности (0, -2, -4°C). Обычно заморозков не бывает только в июле, но в отдельные холодные годы возможны и в июле. Так, в 2011 году опасные заморозки наблюдались в июле.

Град любой интенсивности может нанести вред сельскохозяйственным посевам, автотранспорту, жилым объектам, населению. Град выпадает редко (в среднем от 0,5 до 2 дней за сезон, максимум – 4–8 дней). Град диаметром 20 мм и более фиксируется не ежегодно, преимущественно в отрогах Восточных Саян.

Сильные атмосферные осадки летом (более 120 мм за 48 ч) часто связаны с выходом южных циклонов и характерны для западных и южных районов области. Так, в 2016 г. за два дня (9-10 августа) здесь выпало около 135 мм осадков, что превышает в 1,5 раза месячную норму. А дождь шел еще два дня с меньшей интенсивностью. Однако суточный максимум осадков (82 мм в Иркутске, 1 августа 1962 г.) не был перекрыт.

Суточный максимум осадков в Тулуне (101 мм, 10 июля 1919 г.) [Научно-Прикладной справочник по климату, 1991] был перекрыт (104 мм, 27 июля 2019 г.).



Экстремально высокие снеговые запасы (более 200 мм водного эквивалента за зиму) отмечаются иногда на северных склонах Хамар-Дабана. Здесь же наблюдалось выпадение очень сильного снега, когда количество осадков превысило 20 мм за период менее 12 ч. Аномально высокими значениями снеготолщин обладают высокогорные районы: Байкальский, Аkitканский, Северо-Муйский хребты. Экстремально засушливым (абсолютный минимум осадков достигает в отдельные годы менее 150 мм) является Ольхонский район.

Риски для хозяйственной деятельности и для человека возрастают в условиях сильного холода и жары. В Иркутской области по совокупности факторов выделены районы Крайнего Севера и приравненных к ним территорий, суровость термического режима которых существенно выше, чем в южных и западных районах области и на побережье оз. Байкал.

Установлена пространственно-временная дифференциация повторяемости числа дней с низкими минимальными температурами воздуха за период 1991-2020 гг., которая составила в районах Крайнего Севера (80 - 100 дней с минимальной температурой воздуха ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ ; 30-50 дней с минимальной температурой воздуха ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ ); местностях, приравненных к Крайнему Северу (10-60 дней и 2-20 дней соответственно), а также в северо-западной (Чунский район) и северо-восточной (Жигаловский, Качугский районы) частях остальной территории Иркутской области (50 дней и 10 дней соответственно). На юге области число дней с минимальными температурами воздуха ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  снижается до 4-7 дней, а минимальные температуры воздуха ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  отмечаются редко (до 2 дней).

Наибольшая повторяемость погодных условий, достигающих критериев опасного явления сильный мороз (с минимальными температурами воздуха ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  в течение 5 суток и более) характерная для районов Крайнего Севера, – отмечается практически ежегодно, от 1 до 5 таких случаев за зиму на ст. Ербогачен при понижении температуры ниже  $-50^{\circ}\text{C}$ , а максимальный непрерывный период составил 36 дней (в январе 2001 г.).

Дифференциация по риску продолжительности периода с минимальной температурой воздуха (ниже минус  $30^{\circ}\text{C}$ , ниже минус  $40^{\circ}\text{C}$ ) требует в дальнейшем оценки опасности низких температур воздуха по категориям (интенсивности, распространенности по территории и продолжительности воздействия).

Сильно жаркие дни с максимальной температурой воздуха в течение пяти дней подряд выше  $35^{\circ}\text{C}$  по территории области не отмечаются. В наиболее теплых лесостепных районах области и замкнутых котловинно-долинных формах рельефа повышение максимальной температуры непрерывной продолжительности крайне редки. Чаше там фиксируется аномально жаркая погода, со среднесуточной температурой выше климатической нормы на  $7^{\circ}\text{C}$  и более в течение 5 суток, до 1-2 дней не каждый год.

Вероятность опасных сильнейших засух составляет 1/10 лет, что является низким показателем. Можно отметить засуху 2003 г., когда на территории Усть-Ордынского Бурятского автономного округа в результате высокой температуры до  $30^{\circ}\text{C}$  и отсутствия дождей произошло иссушение пахотного слоя и гибель сельскохозяйственных культур на площади 80 тыс. га; ущерб составил 170 млн. руб. Также в 2015 в мае–июне на территории Иркутской области установилась аномально-сухая, в июне – жаркая с интенсивными сушевыми, погода, приведшая к развитию атмосферной, а затем, в июне – почвенной засухи.

В целом засуха как опасное явление отмечается в степной части центральных (Новонкутск, Балаганск, Усть-Уда, Подволочное) и южных районов (Залари, Кутулик, Черемхово, Инга, Усолье-Сибирское, Ангарск, Шелехов, Хомутово, Иркутск, Патроны, Еланцы, Баяндай, Оса, Бохан, Усть-Ордынский - 5-7 раз в десятилетие), в лесостепной зоне Предбайкальской впадины (Баяндаевский МО) они повторяются в среднем 2-4 раза

в десятилетие. В северных и верхнеленских районах (Катангский, Мамско-Чуйский, Бодайбинский, Качутский, Жигаловский, Казачинско-Ленский, Усть-Кутский)– 1-3 р.; в западных и северо-западных районах области (Гайшетский, Усть-Илимский, Чунский) — 1-2 раза в десятилетие.

Жаркая и сухая погода оказывает влияние на пожарную опасность в лесах. На территории Иркутской области значения пожарной опасности (ПО) в лесу по условиям погоды колеблются от малой (до 1000 ед.) до высокой степени (более 10000 ед.–V класс ПО). Выделяются два периода метеорологических условий, способствующих возникновению лесных пожаров: май-июнь и август-сентябрь.

В пространственном отношении чаще всего возникновение лесных пожаров возможно в северных районах Иркутской области, на побережье оз. Байкал, в лесных массивах Лено-Ангарского плато, в наиболее заселенных южных районах области.

Таким образом, проведенная оценка уровня опасности атмосферных явлений по 33 муниципальным районам Иркутской области позволит определить потребности, мероприятия и варианты адаптационных мероприятий конкретно для этих территорий в современных условиях климата. Представляется необходимым дифференцировать опасность периода с минимальной температурой воздуха (ниже минус 30°C, ниже минус 40°C) в связи с пространственно-временными особенностями низких температур воздуха на территории Сибири и их значимостью для жизнедеятельности населения.

Работа выполнена в рамках Плана НИР № АААА-А21-121012190059-5, АААА-А21-121012190018-2.

1. Национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 года (от 11 марта 2023 г. № 559-р) - URL: <http://static.government.ru/media/> (Дата обращения: 10.08.2023).

2. Приказ Минэкономразвития России от 13.05.2021 № 267 «Об утверждении методических рекомендаций и показателей по вопросам адаптации к изменениям климата» - URL: [http://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz\\_minekonomrazvitiya\\_rossii\\_ot\\_13\\_maya\\_2021\\_g\\_267.html](http://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz_minekonomrazvitiya_rossii_ot_13_maya_2021_g_267.html) (Дата обращения: 10.08.2023).

3. Акимов В.А., Арефьева Е.В., Иванова Е.О., Суцев С.П. Предварительная оценка климатических рисков в области гражданской обороны, защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Технологии гражданской безопасности. - 2021. - Т. 18, № 2. - С.4-8

4. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2019 году». Иркутск: Минприроды и экологии Иркутской области, 2020. 314 с.; 2019. 307 с.; 2018. 249 с.; 2017. 274 с.; 2016. 160 с.; 2015. 175 с.; 2014. 400 с.; 2013. 337 с.; 2012. 227 с.; 2011. 400 с.; 2010. 585 с.; 2009. 488 с.; 2008. 357 с.; 2004. 295 с.; 2001. 383 с.

5. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД) - URL: <http://www.meteo.ru/> (Дата обращения: 10.01.2023).

6. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Вып. 22. – Л.: Гидрометеиздат. – 1991. – 590 с.

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ ДЕГРАДАЦИИ МЕРЗЛОТЫ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНОМ СЦЕНАРИИ ПОТЕПЛЕНИЯ

*Малахова В.В.*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
г. Новосибирск, malax@sscc.ru

Изменения уровня океана в течение ледниково-межледниковых циклов приводили к длительному промерзанию арктического шельфа в субаэральных условиях и к формированию в донных отложениях многолетнемерзлых пород [1]. По имеющимся оценкам площадь арктических шельфов, где мерзлые породы сохранились на сегодняшний день, составляет примерно  $2.5 \times 10^6$  км<sup>2</sup> [2,3]. Деградирующие многолетнемерзлые породы могут содержать значительное количество органики [4].

Температура воздуха в полярных регионах северного полушария растет намного быстрее, чем глобальная. Это потепление заметно повлияло на арктическую криосферу, в первую очередь за счет уменьшения площади морского льда в течение годового цикла. В [5] отмечено, что по данным моделирования проекта CMIP6 (сценарий SSP5-8.5) до конца 21 в. вода в верхнем 2000 метровом слое Северного Ледовитого океана прогреется заметно быстрее относительно средней глобальной температуры океана на тех же глубинах. В [6] по этим же данным проведен анализ чувствительности температуры морского дна к потеплению приземного воздуха до 2300 г. Показано, что коэффициент чувствительности заметно возрастает после 2100 г. для части арктического шельфа, которая освобождается ото льда. Температура поверхности донных отложений напрямую влияет на состояние мерзлоты. С учетом возможных климатических изменений придонной температуры можно ожидать увеличение темпов деградации подводной мерзлоты [7], сопровождаемое интенсивной эмиссией метана в атмосферу региона.

Для оценки последствий деградации мерзлоты необходимо знать мощность и темпы оттаивания твердомерзлых пород в разных районах арктического шельфа. Целью представленной работы является оценка скорости деградации подводной мерзлоты арктического шельфа с помощью численного моделирования в условиях потепления придонных вод до конца 23 века.

Для оценки площади распространения и мощности многолетнемерзлых пород в донных отложениях шельфа проведено моделирование термического состояния донных отложений в геологическом разрезе 1500 м на основе разработанной модели теплопереноса в грунте [8]. В работе используется одномерная модель термофизических процессов в донных отложениях с учетом фазовых переходов между мерзлым и талым грунтом. Модель включает солеперенос и зависимость температуры замерзания воды от концентрации соли и давления в донных отложениях [8]. Область моделирования включает районы арктического шельфа с современной глубиной воды менее 120 м на одноградусной сетке. При моделировании подводной мерзлоты мы не учитывали области шельфа, которые могли находиться под влиянием ледников с учетом модельных оценок [9]. Изолируя землю от приземного воздуха, ледники влияют на температурный режим подледных отложений, и тем самым препятствуют формированию подводной мерзлоты. Моделирование основано на верхних динамических граничных условиях изменения поверхностной температуры донных отложений (температура воздуха или придонной воды) и уровня моря. Поверхностные условия в каждый модельный момент времени и в каждой сеточной ячейке определялись как субаэральные или подводные в зависимости от современной батиметрии и реконструкции уровня моря. Для периодов регрессии моря, когда суша была открыта для выхолаживания, температура на верхней границе принималась

равной приземной температуре воздуха, соленость равна нулю. В случае трансгрессии моря, температура и соленость на верхней границе определялись температурой и соленостью придонной воды. Для нижнего граничного условия использовался неизменный во времени тепловой поток, взятый из глобально распределенных данных [10].

Моделирование проведено для трех периодов по времени:

1 – период времени составил полный ледниковый цикл (120 тысяч лет) до 1850 г.

2 – период 1850-2014 г.

3 – период 2014-2300 г.

На первом этапе с использованием модели теплопереноса при изменениях верхних граничных условий, которые имитируют регрессию и трансгрессию моря, оценивались изменения слоя субаквальной мерзлоты в течение последних 120 тыс. лет. При условиях регрессии моря использовалось пространственное распределение изменений температуры поверхности, смоделированные с помощью модели земной системы CLIMBER-2 для последних 120 тысяч лет [9]. В качестве температуры приземной атмосферы были использованы данные реанализа NCEP–DOE, осредненные для периода 1950-1970 гг. При трансгрессии моря в качестве верхнего граничного условия учитывались среднемесячные температура и соленость придонного слоя воды из климатических данных.

Для оценки состояния субаквальной мерзлоты в донных отложениях шельфа для периода 1850-2014 гг. использовались результаты расчетов климатических моделей проекта CMIP6. А именно учитывалась придонная температура воды, полученная в сценарии «historical» по моделям ACCESS-ESM1-5 [11] и CanESM5 [12].

Для оценки состояния субаквальной мерзлоты в донных отложениях шельфа для будущего периода 2015-2300 использовались результаты расчетов придонной температуры воды по сценарию антропогенных воздействий SSP5-8.5 с климатическими моделями CanESM5 и ACCESS-ESM1-5 до 2300 года.

Выполненное численное моделирование для последних 120 тысяч лет позволило получить картину распространения субаквальной мерзлоты на арктическом шельфе для доиндустриального периода (1850 г.). Модельная подводная мерзлота распространена в донных отложениях арктических морей и занимает площадь морского дна примерно 2.24 миллионов км<sup>2</sup>. Согласно полученным результатам, глубина залегания нижней границы мерзлых не превышает 700 м. Мощность мерзлоты наибольшая у берега, где затопление произошло недавно, и уменьшается к внешнему шельфу.

Далее получено пространственное распределение подводной мерзлоты в донных отложениях арктических шельфовых морей для современного периода (2014 г.) с учетом придонной температуры воды из расчетов с климатическими моделями CanESM5 и ACCESS-ESM1-5. Деградация мерзлого слоя продолжается со стороны нижней и верхней границ. Скорость таяния мерзлоты снизу составляет 1-3 см в год и определяется геотермальным потоком. Деградация сверху происходит и за счет солепереноса, и при росте температуры придонного слоя. Скорости таяния мерзлоты со стороны верхней границы, полученные с учетом температуры из модельных расчетов, представлены на Рис.1а, г. Они зависят от температуры придонного слоя, но в целом для периода 1850-2014 получена похожая картина для обоих расчетов. Максимальная скорость деградации определяется на внешнем шельфе, где достигает более 10 см в год.

Рост температуры придонной воды в период с 2015 по 2100 г. по результатам расчета SSP5-8.5 с климатическими моделями CanESM5 и ACCESS-ESM1-5 приводит к дальнейшему заглублению верхней границы мерзлоты. Получено пространственное распределение скорости деградации субаквальной мерзлоты со стороны верхней границы для периода 2015-2100 (Рис.1б, д). Темпы деградации мерзлоты зависят от используемой модельной оценки температуры придонного слоя. В обоих экспериментах происходит

ускорение деградации многолетнемерзлого слоя по сравнению с историческим периодом. Более высокие скорости таяния мерзлого слоя на шельфе Карского моря, в западной части шельфа Восточно-Сибирского моря и в море Лаптевых. Скорость деградации увеличивается там, где глубина кровли мерзлоты наименьшая и влияние температуры придонного слоя воды существенно. Особенно эта корреляция выражена в расчете для периода 2015-2100 с данными модели CanESM5.

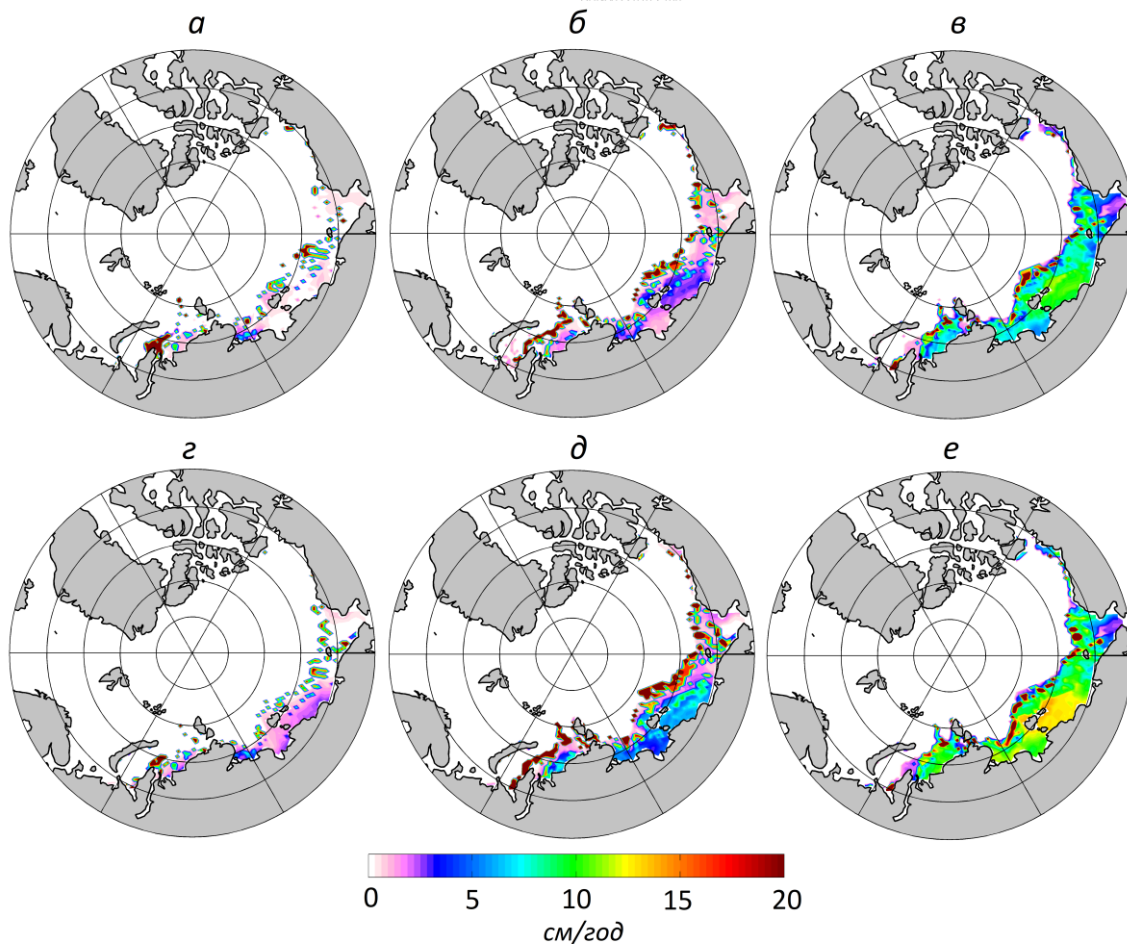


Рисунок 1. Скорость деградации подводной мерзлоты (в см/год) со стороны верхней границы, полученные за периоды: 1850-2014 гг. (а, г), 2015-2100 (б, д) и 2100-2300 (в, е) с использованием придонной температуры воды по сценарию антропогенного воздействия SSP5-8.5 с климатическими моделями ACCESS-ESM1-5 (верхняя панель) и CanESM5 (нижняя панель).

В расчете для периода 2100-2300 подводная мерзлота продолжает деградировать с более высокой скоростью для всей области шельфа (Рис. 1в, е). Минимальные средние скорости получены в расчете с использованием данных ACCESS-ESM1-5 (7-8 см/год), и максимальны в расчете с использованием данных CanESM5 (10-12 см/год). Скорость таяния мерзлоты снизу для будущего периода также составляет 1-3 см в год, как и для исторического и определяется геотермальным потоком.

С использованием модели термофизических процессов в донных отложениях получены оценки состояния многолетнемерзлых пород шельфа Арктики при изменениях придонной температуры по расчётам с климатическими моделями ансамбля CMIP6 до конца 23 века. В настоящем исследовании был выбран наиболее экстремальный сценарий с высокими антропогенными выбросами парниковых газов SSP5-8.5. Показано, что

для прогноза темпов деградации подводной мерзлоты, одним из основных фактором является температура придонной воды. В историческом периоде между сценариями обнаруживаются лишь небольшие различия, но в 22-23 веках таяние мерзлоты происходит в 5-10 раз быстрее и различия между сценариями усиливаются. Средние скорости деградации подводной мерзлоты составили 1-2 см/год для периода 1950-2015, 5 см/год для 2015-2100 и 10 см/год для периода 2100- 2300.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект 0251-2021-0003) и при поддержке гранта РНФ № 20-11-20112 (в части анализа темпов деградации мерзлоты).

1. Гаврилов А. В. Типизация арктических шельфов по условиям формирования мерзлых толщ // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 3. С. 69–79.

2. Malakhova V.V. The response of the Arctic Ocean gas hydrate associated with subsea permafrost to natural and anthropogenic climate changes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 606. P. 012035.

3. Overduin P., Schneider von Deimling T., Miesner F., Grigoriev M., Ruppel C., Vasiliev A., Lantuit H., Juhls B., Westermann S. Submarine permafrost map in the arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // J. Geophys. Res.: Oceans. 2019. V. 124. P. 3490-3507.

4. Schuur E., McGuire A., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. V. 520. P. 171–179.

5. Shu Q., Wang Q., Årthun M., Wang S., Song Z., Zhang M., Qiao F. Arctic Ocean Amplification in a warming climate in CMIP6 models // Sci. Adv. 2022. V. 8. P. 30.

6. Malakhova V.V., Eliseev A.V. A Relationship between Changes of Surface Air and Sea Floor Temperatures at the Arctic Shelf from the Coupled Models Intercomparison Project, Phase 6 Data // Atmosphere. 2023. V. 14(6). P.1024.

7. Wilkenskjeld, S., Miesner, F., Overduin, P. P., Puglini, M., and Brovkin, V. Strong increase in thawing of subsea permafrost in the 22nd century caused by anthropogenic climate change // The Cryosphere. 2022. V. 16. P. 1057–1069.

8. Малахова В.В., Елисеев А.В. Влияние диффузии солей на состояние и распространение многолетнемерзлых пород и зоны стабильности метан-гидратов шельфа моря Лаптевых // Лёд и Снег. 2020. Т.60(4). С.533-546.

9. Ganopolski A., Calov R., Claussen M. Simulation of the last glacial cycle with a coupled climate ice-sheet model of intermediate complexity // Climate of the Past. 2010. V. 6. P. 229–244.

10. Davies J. Global map of solid Earth surface heat flow // Geochem. Geophys. Geosyst. 2013. V. 14. P. 4608-4622.

11. Ziehn T., Chamberlain M., Law R., Lenton A., Bodman R., Dix M., Stevens L., Wang Y.P., Srbinovsky J. The Australian Earth system model: ACCESS-ESM1.5 // J. South. Hem. Earth Sys. Sci. 2020. V. 70. P. 193–214.

12. Swart N., Cole J., Kharin V., Lazare M., Scinocca J., Gillett N., Anstey J., Arora V., Christian J.R., Hanna S. et al. The Canadian Earth System Model version 5 (CanESM5.0.3) // Geosci. Model. Dev. 2019. V. 12. P. 4823–4873.

## **ВЛИЯНИЕ НЕЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НИЖНЕЙ СУБТРОПИЧЕСКОЙ СТРАТОСФЕРЫ НА АНТАРКТИЧЕСКИЙ ПОЛЯРНЫЙ ВИХРЬ**

*Масленникова Э.А., Зуев В.В., Савельева Е.С., Павлинский А.В.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
maslennikovaerika@gmail.com

Стратосферный полярный вихрь – это сезонная область низкого давления, характеризующаяся сильным ветровым поясом, который изолирует полярный воздух от средних и субполярных широт [1]. Полярные вихри играют существенную роль в распределении стратосферного озона, движении воздушных масс в полярной и субполярной стратосфере и температурном режиме над полярной областью. Антарктический полярный вихрь формируется в осенний период, достигая пика своей интенсивности в начале весны. Сезонная динамика антарктического полярного вихря хорошо согласуется с внутригодовыми изменениями температуры нижней субтропической стратосферы: увеличение температуры в субтропиках относительно сезонного хода в поздневесенний период (октябрь–ноябрь) приводит к усилению антарктического вихря, а уменьшение – к его ослаблению [2, 3]. Максимум температуры в сентябре наблюдается одновременно с пиком активности полярного вихря. Считалось, что влияние изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря происходит, когда изменения температуры наблюдаются во всем широтном диапазоне (20–40° ю.ш.). В данной работе рассмотрена роль изменений температуры нижней субтропической стратосферы в усилении антарктического полярного вихря.

В работе использовались ежечасные данные реанализа ERA5 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (<https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>) [4] с горизонтальным разрешением 0,25°x0,25°: зональный ветер в области 50–90° ю.ш. на уровне 50 гПа и температура в области 10–40° ю.ш. на уровне 70 гПа за период с 1979 по 2021 гг. В работе во всех расчетах с температурой использовались температурные аномалии из-за значительной межгодовой изменчивости температуры субтропической стратосферы. Температурные аномалии получались вычитанием из среднесуточных значений среднегодовых значений с теми же параметрами. Для исследования влияния незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря использовался корреляционный анализ. Коэффициенты корреляции рассчитывались между максимальными зональными средними значениями скорости зонального ветра в диапазоне 50–90° ю.ш. и максимальными зональными средними значениями температуры в диапазоне 10–40° ю.ш., усредненными для диапазонов шириной 4°, 8°, 14° и 20° по широте. Были получены коэффициенты корреляции для каждого дня с мая по ноябрь за 1979–2021 гг. В работе в качестве незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы рассматривались максимальные значения аномалий температуры, усредненных для 4°-х диапазонов по широте, в области 10–40° ю.ш.

Для исследования влияния незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря был осуществлен корреляционный анализ. На рис. 1 приведены временные изменения коэффициентов корреляции между максимальной скоростью зонального ветра в диапазоне 50–90° ю.ш. и максимальными значениями аномалий температуры в диапазоне 10–40° ю.ш., усредненными для диапазонов шириной 4°, 8°, 14° и 20° по широте за 1979–2021 гг. С мая по август коэффициент корреляции практически незначим, при этом имеет более высокие



значения при расчете с использованием  $20^\circ$ -х аномалий температуры (рис. 1а). Корреляция начинает увеличиваться со второй половины сентября. В октябре и ноябре происходит уменьшение стратосферного меридионального температурного градиента в связи с потеплением в полярной области, в результате антарктический полярный вихрь становится более чувствительным к изменениям температуры нижней субтропической стратосферы. Как видно из рис. 1б, начиная с 11 ноября влияние незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы значительно усиливается (коэффициенты корреляции, полученные с использованием максимальных  $4^\circ$ -х средних значений по температуре), превышая общее влияние температуры субтропической стратосферы (коэффициенты корреляции, полученные с использованием  $20^\circ$ -х средних значений).

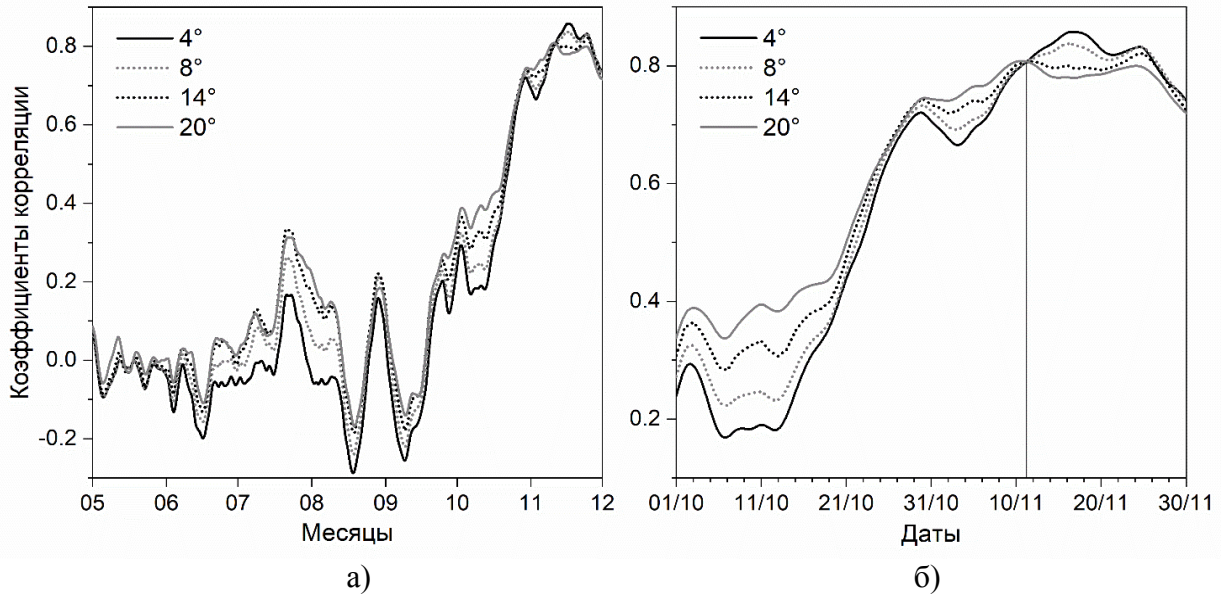


Рисунок 1. Временной ход коэффициентов корреляции между максимальными зональными средними аномалиями температуры для диапазонов шириной  $4^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $14^\circ$  и  $20^\circ$  в области  $10\text{--}40^\circ$  ю.ш. и максимальными зональными средними значениями скорости зонального ветра в области  $50\text{--}90^\circ$  ю.ш. с мая по ноябрь (а) и с октября по ноябрь (б).

Для рассмотрения динамики влияния незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на антарктический полярный вихрь на рис. 2 приведены диаграммы рассеяния максимальной скорости зонального ветра и максимальной температуры, усредненной для  $4^\circ$ -х диапазонов по широте, для 15 октября, 1 ноября и 15 ноября за 1979–2021 гг. С октября по ноябрь наблюдается постепенный рост коэффициента корреляции: 15 октября он составил  $-0,24$ , 1 ноября  $-0,69$  и 15 ноября  $-0,84$ . Существенное увеличение корреляции между рассматриваемыми параметрами свидетельствует об усилении влияния незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря в поздневесенний период.

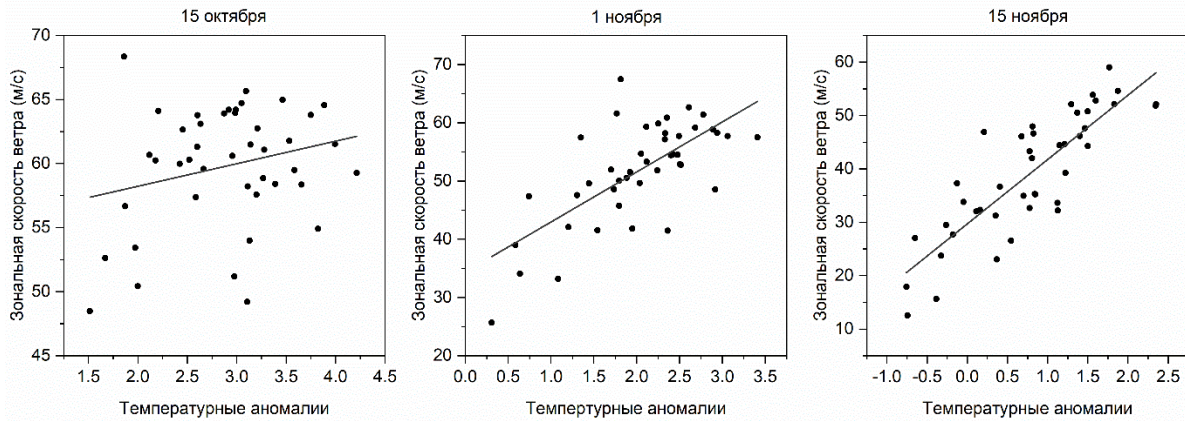


Рисунок 2. Диаграмма рассеяния максимальных зональных средних значений скорости зонального ветра в области 50–90° ю.ш. и максимальных зональных средних аномалий температуры, усредненных для 4°-х диапазонов по широте, в области 10–40° ю.ш. для 15 октября и 1, 15 ноября с 1979 по 2021 гг.

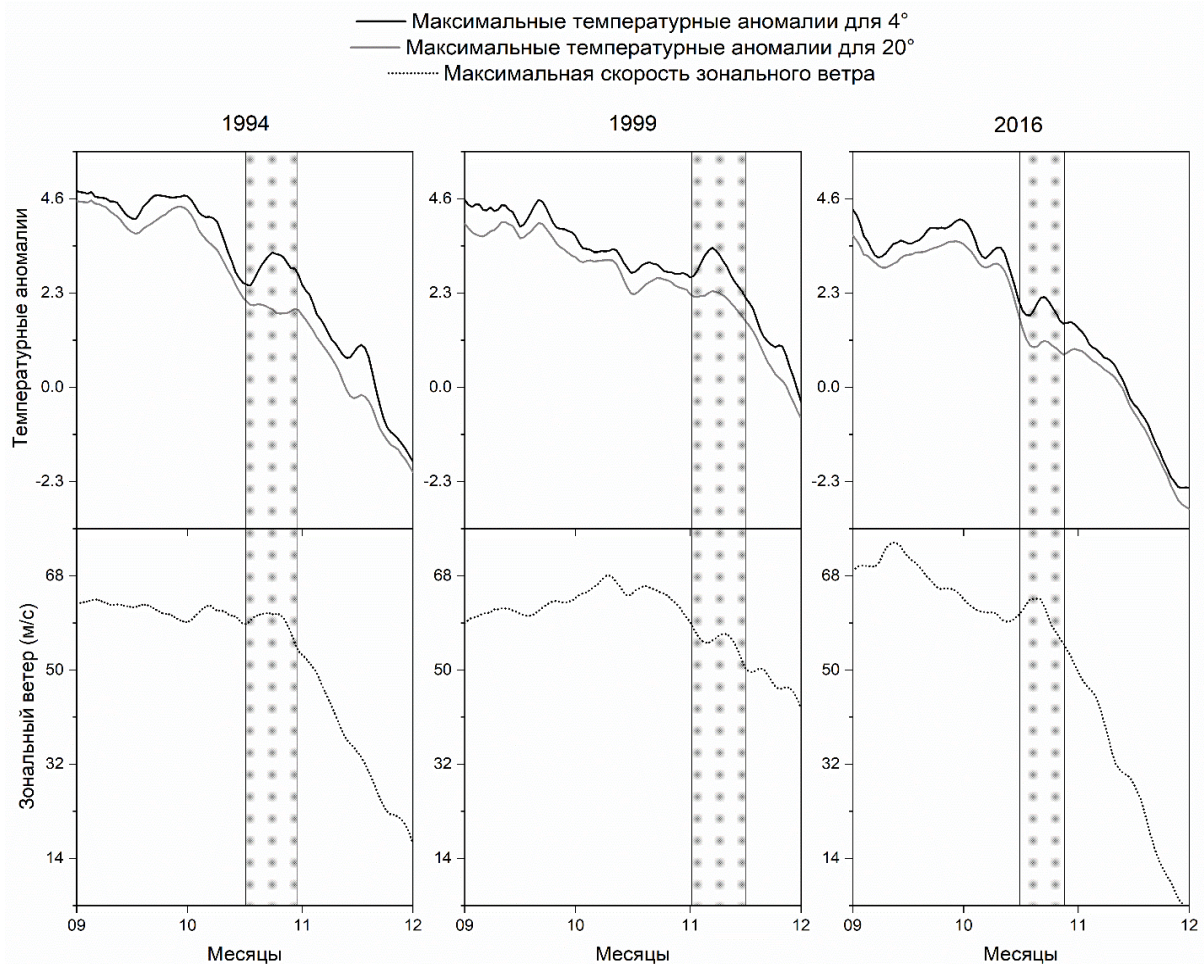


Рисунок 3. Временной ход среднесуточных максимальных зональных средних аномалий температуры, усредненных для 4° и 20°-х диапазонов по широте, в области 10–40° ю.ш. и максимальных зональных средних значений скорости зонального ветра в области 50–90° ю.ш. с сентября по ноябрь за 1994, 1999, 2016 гг.

На рис. 3 проиллюстрировано влияние незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря на примере 1994, 1999, 2016 гг. На рис. 3 выделены временные диапазоны (17–31 октября 1994 г., 1–16 ноября 1999 г., 16–28 октября 2016 г.), когда динамика максимальных аномалий температуры, усредненных для 4°-х диапазонов, не была согласована с динамикой максимальных аномалий температуры, усредненных для 20°-х диапазонов (изменения параметров асинхронны). В выделенные периоды наблюдалась согласованность динамики максимальных значений скорости зонального ветра с динамикой максимальных аномалий температуры, усредненных для 4°-х диапазонов, а не для 20°-х. Таким образом, на рис. 3 продемонстрировано проявление влияния незначительных изменений температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря в октябре–ноябре.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № 121031300156-5.

1. Lecouffe A., Godin-Beekmann S., Pazmiño A., Nauchecorne A. Evolution of the intensity and duration of the Southern Hemisphere stratospheric polar vortex edge for the period 1979–2020 // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22, N 6. P. 4187–4200.

2. Зуев В.В., Боровко И.В., Крупчатников В.Н., Савельева Е.С. Влияние температуры нижней субтропической стратосферы на динамику антарктического полярного вихря // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 5. С. 415–418.

3. Савельева Е.С. Динамика антарктического полярного вихря во время внезапного стратосферного потепления в 2002 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2020. Т. 33, № 1. С. 50–55.

4. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., de Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J. –N. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 2020. V. 146, N 730. P. 1–51.

## БАЙЕСОВЫ ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЙ СТОКА РОССИЙСКИХ РЕК В XXI ВЕКЕ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ С АНСАМБЛЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СМIP6

*Медведев А.И.<sup>1</sup>, Елисеев А.В.<sup>1,2</sup>, Мохов И.И.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

Изменения климата и их последствия, в частности изменения характеристик гидрологического цикла, - предмет активных исследований в последние десятилетия. В то время как на глобальном уровне проявляется определенная стабильность оценок, региональные оценки изменений, особенно водных ресурсов, характеризуются большой неопределенностью. Это, в частности, касается таких сложных гидрологических систем, как речные системы. В рамках исследований, связанных с шестой фазой международного проекта сравнения моделей климата (Coupled Models Intercomparison Project, phase 6 - СМIP6), особое внимание было уделено более детальному пониманию влияния климатических изменений на гидрологический цикл. Тем не менее получение надежных прогностических оценок на региональном уровне остается серьезной проблемой.

С глобальным потеплением связана общая интенсификация гидрологического цикла. При этом для региональных изменений характерна большая неопределенность, в частности для речных систем в российских регионах. Это связано с рядом факторов, в том числе со структурными различиями моделей, с различиями используемых параметризаций не разрешаемых явно физических процессов и особенностями численных реализаций явно разрешаемых процессов. Существенным фактором является неопределенность сценариев внешних воздействий на климатическую систему, а также начальных условий.

Неопределенность оценок будущих изменений климата может быть уменьшена путем применения байесовского подхода к оценке изменений в гидрологическом цикле рек, в частности российских рек, в 21 веке на основе расчетов с ансамблем моделей СМIP6.

В данной работе использовались среднегодовые данные о полном стоке по расчетам с моделями СМIP6 (СМIP переменная *mrro*) при сценариях "historical", SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5 [1]. Эти данные усреднялись по водосборам нескольких рек, включая Волгу, Обь, Енисей, Лену, Амур и Селенгу. В случае наличия расчётов для одной и той же модели с разными начальными условиями в базе данных СМIP6, в анализ включался только один из них. Для анализа использовались функции правдоподобия стока, считавшиеся нормально распределёнными на каждом временном масштабе. При этом учитывалось соответствие реальным данным среднего многолетнего стока, линейного тренда стока, значение, построенное в виде комбинации среднеквадратичного отклонения и коэффициента временной корреляции между компонентами модельных и эталонных рядов на междесятилетних временных масштабах и аналогичное значение, характеризующие межгодовую изменчивость стока. В дополнение к упомянутым весам, был также применен комбинированный вес, отражающий качество модели на всех рассмотренных временных масштабах. Вычисленные весовые множители затем нормировались.

Функции правдоподобия стока считались нормально распределенными на каждом временном масштабе

$$w_i^{(k)} = \chi(R_i^{(k)}; R_i^{(0)}, \delta_j^{(0)}),$$

где  $\chi(x; x_0, \delta)$  – нормальное распределение переменной  $x$  со средним  $x_0$  и стандартным отклонением  $\delta$ .



Компоненты рядов, характеризующие междесятилетнюю изменчивость стока, были выделены из соответствующих исходных рядов с помощью полосового фильтра Ланцоша [2]. Эти параметры были выбраны после анализа спектральной плотности рядов стока, вычисленной с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье. Они соответствуют граничным временным масштабам полосового фильтра 10 и 40 лет. В процессе выбора параметров фильтра Ланцоша учтено, что доминирующий максимум спектральной плотности (в случае всех использованных здесь временных рядов он располагается в интервале от 10 до 25 лет) должен находиться внутри области, выделенной полосовым фильтром, при этом сохраняя достаточное расстояние до её границ.

Основными отличиями данного подхода от работы [3] являются выделение межгодового и междесятилетнего временных интервалов и учёт временной корреляции модельных данных с данными наблюдений на междесятилетнем интервале временных и учёт временной корреляции модельных данных с данными наблюдений в междесятилетнем интервале временных масштабов.

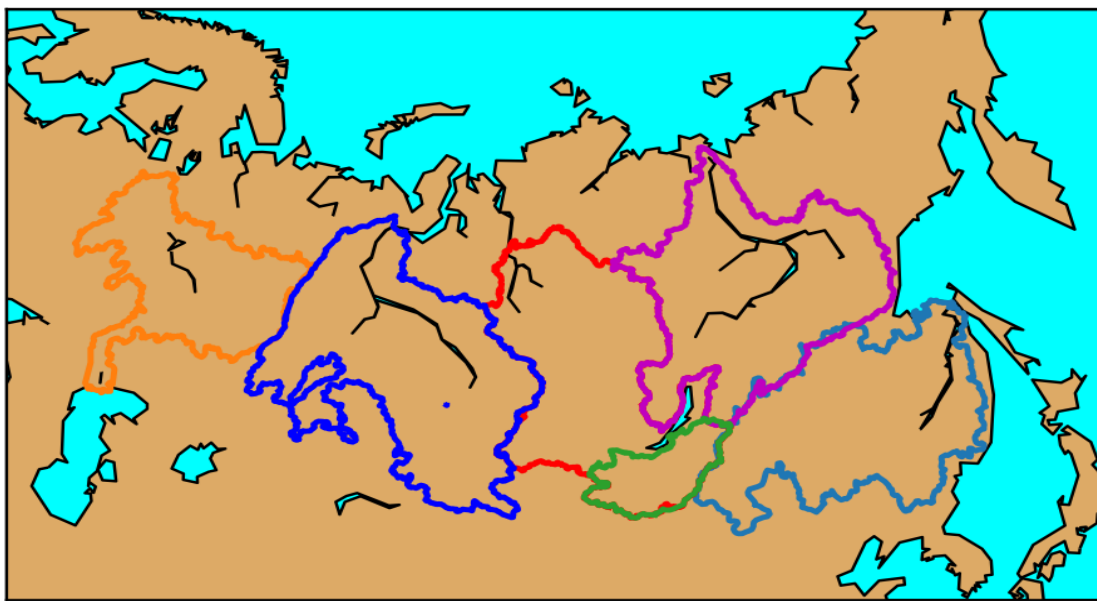


Рисунок 1. Границы водосборов рек, для которых проводился анализ: Волги (оранжевая), Оби (синяя), Енисея (красная), Лены (фиолетовая), Амура (голубая) и Селенги (зеленая).

Использование комбинированного веса позволило достичь лучшего согласования между эталонными и модельными данными, что обусловлено отсутствием смещения прогнозируемых значений относительно эталонных данных и точной воспроизводимостью циклов. Комбинированный вес проявляет специфические особенности, включая квазипериодические колебания в сценарии SSP5-8.5 и наличие положительного тренда, и демонстрирует наименьшее межмодельное стандартное отклонение годового стока для всех рассмотренных водосборов. В рамках анализа были определены величины тренда и соответствующее ему отклонение для каждого рассматриваемого метода осреднения, и результаты были представлены для каждой исследуемой реки и каждого прогнозного сценария.

Отмечены статистически значимые тренды увеличения стока Амура, Лены, Енисея и Оби. Для реки Обь отмечен отрицательный тренд стока в случае сценария SSP1-2.6, при котором содержание демонстрирует  $\text{CO}_2$  в атмосфере уменьшается после середины 21 века.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 21-17-00012.

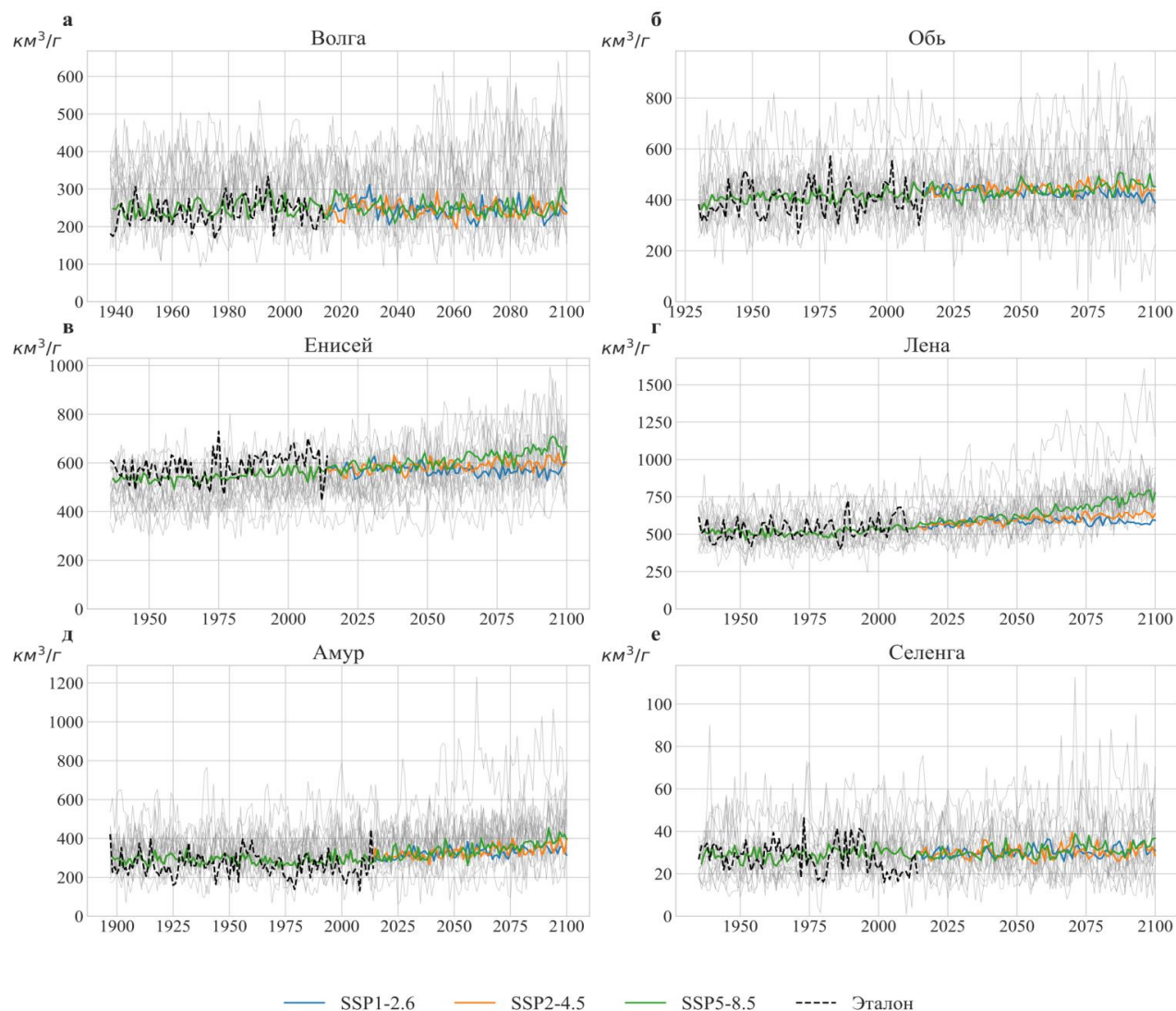


Рисунок 2. Ансамблевые средние годового стока для различных рек, полученные с использованием комбинированного веса при сценариях SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5.

1. Duchon C. E. Lanczos filtering in one and two dimensions. – Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1979, vol. 18. No. 8, pp. 1016-1022.

2. Gidden M. J. et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century. - Geoscientific model development, 2019, vol. 12, No. 4, pp. 1443-1475.

3. Липавский А. С., Елисеев А. В., Мохов И. И. Байесовы оценки изменения стока Амура и Селенги в XXI веке по результатам ансамблевых модельных расчетов CMIP6. - Метеорология и гидрология, 2022, No. 5, с. 64-82.

## ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В КОНТЕКСТЕ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

*Недобега А.П., Иванов Д.Л.*

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, Республика Беларусь, г. Минск,  
nedobegaana@gmail.com, geoivanov@mail.ru

Началом потепления в ряде регионов мира, в том числе и для территории Беларуси, считается 1989 г. Этот этап, начавшийся с зимы 1989 г., называют «периодом активизации потепления» в Беларуси [1,2]. Именно с этого года отмечаются резкие повышения температуры зимой и устойчивые отклонения среднегодовых температур воздуха, от климатической нормы.

За последние годы темпы роста глобальной температуры по миру составили около 0,2 °С за 10 лет [3]. Вместе с тем в отдельных регионах мира температуры растут значительно быстрее. Особенно это характерно для умеренных и высоких широт северного полушария. Так, на территории России их рост составил около 0,45 °С за 10 лет, а в полярных регионах скорость роста среднегодовых температур достигает почти 1 °С за 10 лет [4].

Территория Беларуси, находящаяся в умеренном климатическом поясе, испытывает более интенсивный, по сравнению со средне глобальными данными, рост среднегодовых температур. Несомненно, этому способствуют не только широтное расположение территории страны и ее открытость для проникновения с запада теплых влажных воздушных масс с Атлантики в течение всего года, но и проникновение сухих жарких воздушных масс из субтропических широт в летнее время с более южных регионов.

В ходе работы были проанализированы статистические материалы Белгидромета за 1971-2020гг, а также данные ряда государственных климатических кадастров Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь [5], характеризующих особенности климата на территории страны.

Рассмотрена динамика среднегодовых температур по периодам с интервалом в 10 лет по отношению к климатической норме. За климатическую норму принимается температура 5,9 °С, взятая за интервал 1961-1990гг до начала активного потепления. В перспективе представляется целесообразным выполнить расчеты динамики температур исходя из климатической нормы за 1881-1988гг., т.е. с момента начала метеонаблюдений на территории Беларуси до начала активного потепления.

Анализ материалов показал, что за указанный промежуток времени (1971-2022 гг) отмечаются существенные колебания среднегодовых температур от климатической нормы (5,9 °С за 1961-1990 гг) как в положительную, так и в отрицательную сторону (рисунок 1). Величина колебаний среднегодовых температур при этом существенно варьирует год от года от (-1,7) до +3,1 °С по отношению к климатической норме. При этом, если до 1987 г чаще наблюдались отрицательные отклонения от климатической нормы, то после 1987 г преобладают уже положительные. Последнее отклонение среднегодовой температуры от положительной нормы с отрицательным значением отмечалось в 1996 г (-0,3 °С). Начиная с 1997 г, все отклонения среднегодовой температуры от климатической нормы имеют только положительные значения (рис. 1).



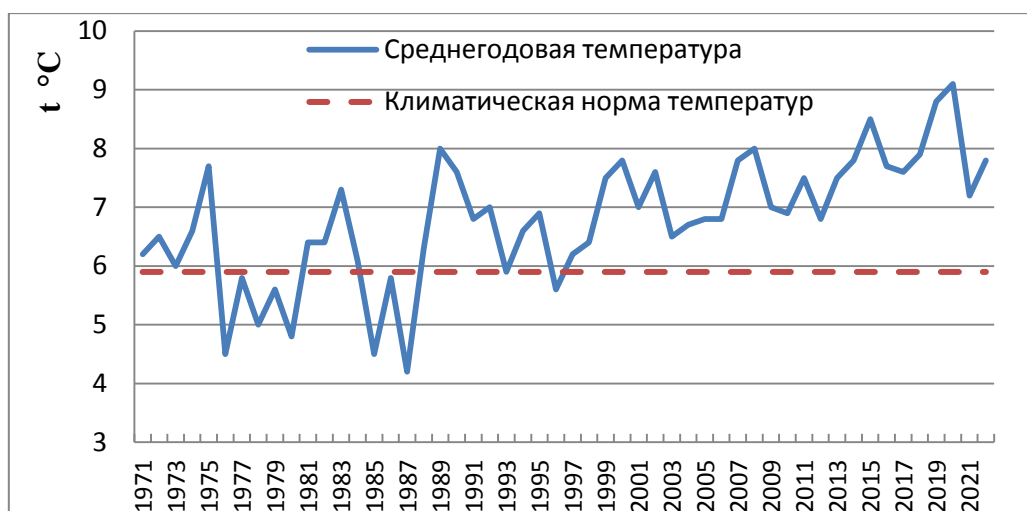


Рисунок 1. Отклонения средней годовой температуры воздуха ( $\Delta T$ ) по Беларуси от климатической нормы ( $+5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  за период 1961-1990 гг).

Для более визуального представления о ходе среднегодовых температур проанализирована динамика средних годовых температур по десятилетним интервалам по отношению к климатической норме ( $5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (таблица 1). Данные таблицы 1 указывают на неуклонный рост среднегодовых температур от десятилетия к десятилетию, хотя среднегодовая температура за первое десятилетие (1971-1980 гг) еще ниже климатической нормы. Однако, уже начиная с периода 1981-1990 гг среднегодовые температуры за десятилетия постоянно превышают климатическую норму и неуклонно растут. Полученные данные позволяют рассматривать 10-ти летний период 80-х годов фактически как начальный этап современного потепления. Максимальные значения среднегодовых температур зафиксированы для последнего десятилетия (2011-2020 гг), они превысили климатическую норму более чем на  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и достигли значения  $7,92\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отклонение средних температур от климатической нормы от десятилетия к десятилетию динамично увеличивается – с  $(-0,03)$  до  $2,02\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 2011-2020 гг.

**Таблица 1. Динамика среднегодовой температуры воздуха по Беларуси за 1971-2022 гг.**

Климатическая норма, $^{\circ}\text{C}$ за 1961-1990гг.	Средняя годовая температура воздуха (t), $^{\circ}\text{C}$ за десятилетие / Отклонение средних (t) $^{\circ}\text{C}$ за 10 лет от климатической нормы					
	1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2010	2011-2020	2021-2022
5,9	5,87 / -0,03	6,26 / 0,36	6,67 / 0,77	7,11 / 1,21	7,92 / 2,02	7,5/1,6

Также неуклонно увеличивается и интенсивность роста средних температур каждого следующего десятилетия по отношению к предыдущему от  $0,39$  и  $0,41\text{ }^{\circ}\text{C}$  в 80-е и 90-е годы до  $0,44\text{ }^{\circ}\text{C}$  в период 2001-2010 гг (таблица 2), что существенно выше среднемировой нормы, которая в середине двухтысячных годов составляла около  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 10 лет [4]. За последнее истекшее десятилетие (2011-2020 гг) темпы роста температуры превысили  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  (таблица 2), что свидетельствует о прогрессирующем ходе потепления и нарастании его интенсивности.

Вместе с тем заслуживает внимания тот факт, что интенсивность роста средней температуры двух последних лет начавшегося десятилетия (2021-2022 гг) существенно

замедлилась. За эти два года она составила (-0,42 °С) по отношению к предыдущему десятилетию (табл. 2). Говорить на основании данного факта о том, что потепление в своем развитии уже достигло апогея было бы преждевременным. Однако, снижение динамики роста температур по отношению к предыдущему десятилетию, возможно, говорит в пользу замедления интенсивности этого процесса. Конечно, делать окончательные выводы по этому поводу еще рано, т.к. десятилетие только началось, а колебания среднегодовых температур в 2021 и 2022 вполне сопоставимы и вписываются в среднегодовые вариации предыдущих лет (см. рис. 1). В любом случае необходимы дальнейшие наблюдения за динамикой этого процесса в течение не только текущего, но и последующего десятилетий.

**Таблица 2. Рост интенсивности потепления по десятилетиям за 1971-2022 гг.**

Периоды (десятилетия)	Средняя годовая температура воздуха (t), по периодам °С	Темпы роста средних температур °С за 10 лет.
1971-1980	5,87	-
1981-1990	6,26	0,39
1991-2000	6,67	0,41
2001-2010	7,11	0,44
2011-2020	7,92	0,81
2021-2022	7,5	-0,42

Таким образом, глобальное потепление климата на территории Беларуси протекает все ускоряющимися темпами и испытывает более интенсивный, по сравнению со средние глобальными данными, рост температур [6], который начиная с 1990 г. составляет 0,41-0,81 °С за 10 лет. При этом интенсивность роста от десятилетия к десятилетию увеличивается и за последнее десять лет (с 2010 по 2020 гг) она превысила 0,81 °С [7].

Особенность нынешнего потепления не в его продолжительности, а в высокой интенсивности и быстрых темпах роста температуры воздуха, которая в среднем за 30 лет (1989-2020 гг.) превысила климатическую норму на 2,02 °С.

Следствием наблюдаемого потепления является увеличение экстремальности климатических характеристик и рост количества опасных метеорологических явлений (ОМЯ) во многих регионах, в том числе и в Беларуси. Наибольшее количество ОМЯ в стране приходится на теплый период [8] среди них наиболее частыми являются заморозки, сильный ветер, сильные дожди и ливни, сильные снегопады и чрезвычайная пожарная опасность.

1. Седьмое национальное сообщение Республики Беларусь в соответствии с обязательствами по рамочной конвенции ООН об изменении климата. – Минск, 2018. – 320 с.

2. Прогноз изменения окружающей природной среды Беларуси на 2010–2020 гг / Под ред. В.Ф. Логинова. – Мн.: «Минсктипроект», 2004. – 180 с.

3. Логинов, В.Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия / В.Ф. Логинов. – Минск: Тетра Системс, 2008. 496 с.

4. Малинин, В.М., Гордеева С.М. О современных изменениях глобальной температуры воздуха / В.М. Малинин, С.М. Гордеева // Общество. Среда. Развитие. 2011. № 2. С. 215-221.

5. Обзор климатических особенностей и опасных гидрометеорологических явлений на территории Республики Беларусь. Минск: Белгидромет, 1996-2016.

6. Иванов, Д.Л., Ивашко, Е.А. Экстремально высокие темпы роста температуры воздуха как характерная черта и особенность климата территории Беларуси в условиях

глобального потепления / Д.Л. Иванов, Е.А. Ивашко // Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках. Материалы междунар. науч.-практич. оч.-заоч. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, 60-летию кафедры физич. географии, 100-летию со дня рождения проф. О.Ф. Якушко, Минск, 2021. – Минск: БГУ. С. 329-332.

7. Государственный климатический кадастр. Обзор климатических особенностей и опасных гидрометеорологических явлений на территории Республики Беларусь в 2017 году. – Минск, 2018. 51 с.

8. Иванов, Д.Л., Парахневич, Р.В. Дорожно-транспортная ситуация на дорогах Минской области как отражение климатической составляющей / Д.Л. Иванов, Р.В. Парахневич // Весці БДПУ. Серыя 3. Фізіка. Матэматыка. Інфарматыка. Біялогія. Геаграфія. 2022. № 3 (113). С. 23-31.

## СОВРЕМЕННЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ

*Переведенцев Ю.П., Мирсаева Н.А., Шанталинский К.М., Николаев А.А.*  
Казанский (Приволжский) федеральный университет, [upereved@kpfu.ru](mailto:upereved@kpfu.ru)

Проблема изменения современного климата по-прежнему остается одной из самых цитируемых как в научных кругах, так и в средствах массовой информации. В мире и России регулярно публикуются обзоры о текущем состоянии климатической системы Земли, о наблюдаемых климатических аномалиях, рекордах и экстремальных погодных событиях [1]. Ни у кого не вызывает сомнений факт глобального потепления климата последних десятилетий, что подтверждается как наземными, так и космическими наблюдениями. Как отмечено в работе [2], главный вопрос заключается в поиске физических причин потепления и количественных оценок вкладов различных факторов в изменения глобального климата и тем более его прогноза с учетом антропогенных воздействий. Глобальные климатические события находят свой отклик в различных регионах Земли. В частности, климатические изменения на территории Среднего Поволжья активно изучаются климатологами Казанского университета начиная с 1812 г. с момента открытия в нем Метеорологической обсерватории (МО). Отдельные результаты этих исследований представлены в авторских работах [3-5].

Цель настоящего сообщения рассмотреть климатические изменения на территории Европейской территории России (ЕТР) в XIX-XXI веках на фоне колебаний приповерхностной температуры воздуха (ТВ) осредненной по территории всего Северного полушария (СП).

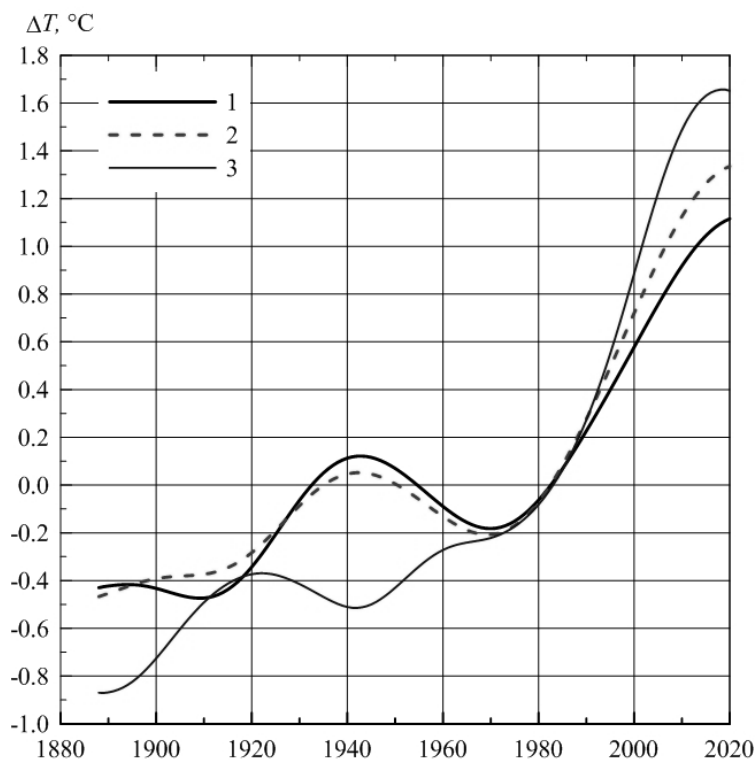


Рисунок 1. НЧК с периодом более 25 лет аномалий среднегодовой приповерхностной температуры воздуха (норма: 1961-1990 гг.): 1 – Северное полушарие, 2 – суша Северного полушария, 3 – Приволжский федеральный округ.

Рассмотрим временные ряды аномалий осредненной по Северному полушарию приповерхностной температуры воздуха за весь период инструментальных наблюдений с 1850 по 2022 гг. (данные CRU), сглаженные низкочастотным фильтром Поттера с точкой отсечения 25 лет. Как видно из рис. 1, наблюдаются периоды похолодания и потепления различной интенсивности в рассматриваемой период. Согласно линии низкочастотной компоненты (НЧК) в СП с 1970 по 2022 г. среднегодовая температура увеличилась на ~1,3°C. Следует отметить, что в начале XX века заметное потепление было обусловлено естественными факторами – из-за ослабления вулканической активности произошло усиление прозрачности атмосферы и потока солнечной радиации (пик потепления пришелся ~на 1945 г.). И если до 1970-х годов в ходе сглаженных кривых аномалий ТВ СП, с одной стороны, и Поволжья, с другой, отмечался противофазный характер, то в последние десятилетия наблюдается повсеместный рост температуры. При этом потепление идет более интенсивно в регионе, чем в целом по СП.

Рассматривалась корреляционная зависимость температуры воздуха на ст. Казань, университет с приповерхностной температурой Северного полушария для всех месяцев года, 4-х сезонов и в целом года для 2-х периодов: 1850-2021 и 1970-2021 гг. Предварительное исследование показало, что колебания температуры в Казани тесно связаны с изменениями ТВ ЕТР, что позволяет обобщать полученные результаты для рассматриваемого региона. Значения коэффициентов корреляции ( $r$ ) оказались наиболее высокими во все месяцы года, кроме летних, для всего периода 1850-2021 гг. Для годовых значений величины  $r=0,74$ . Еще более высокие коэффициенты корреляции между ТВ и приповерхностной температурой суши СП (в этом случае для годовых температур  $r=0,79$ ). Корреляционные связи для периода 1970-2021 гг. (периода активной фазы потепления) несколько слабее, чем для 1850-2021 гг., кроме летних месяцев. Коэффициенты детерминации показывают, что во всех случаях значения  $r$  значимы. В табл. 1 приводятся данные о величинах  $r$  для центральных месяцев сезонов, года и сезонов в целом. Согласно коэффициентам детерминации ( $r^2$ ) годовые значения ТВ в Казани существенно зависят от температурного режима СП.

**Таблица 1. Коэффициенты корреляции (R) температуры воздуха на ст. Казань, университет с приповерхностной температурой Северного полушария (А), температурой суши Северного полушария (Б)**

	I	IV	VII	X	Год	Лето	Зима	Весна	Осень
<b>А</b>									
1850-2021 г.									
$R$	0,56	0,46	0,33	0,46	0,74	0,48	0,58	0,65	0,53
$R^2$	32	21	11	21	55	24	33	43	28
1970-2021 гг.									
$R$	0,43	0,20	0,39	0,41	0,67	0,52	0,49	0,48	0,49
$R^2$	18	04	15	16	45	27	24	23	24
<b>Б</b>									
1850-2021 г.									
$R$	0,68	0,52	0,40	0,53	0,79	0,52	0,66	0,70	0,61
$R^2$	46	27	16	29	63	27	43	49	37
1970-2021 гг.									
$R$	0,51	0,25	0,47	0,43	0,70	0,57	0,55	0,52	0,53
$R^2$	26	06	22	18	49	33	31	27	29

Примечание:  $R^2$  – коэффициент детерминации в %.

С целью определения географических различий в изменениях температуры воздуха на ЕТР в 1891-2020 гг. были построены для 6 европейских станций, СП и суши СП НЧК средней годовой ТВ (СГТВ), средней зимней ТВ (СЗТВ) и средней летней ТВ (СЛТВ) с периодом более 20 лет. На кривых НЧК среднегодовых температур активная фаза потепления на всех ст. (Калининград, Минск, Смоленск, Елаьтма, Казань), кроме ст. Уфа, началась раньше (1940-1960 гг.), чем в целом по СП (1970 г.). Зимой на всех станциях активная фаза потепления началась в 1970 г., что практически совпадает с ее началом в СП. В летний период на СП потепление началось в 1970 г., а на станциях Калининград, Минск, Смоленск, Елаьтма с 1982 г., т.е. с заметным запаздыванием, кроме ст. Уфа, где потепление идет с 1970 г.

Построенные профили НЧК для ТВ по среднегодовым, зимним и летним месяцам для западной и восточной группы станций обнаруживают много общего в их структуре, что свидетельствует об однородном характере климатических изменений на ЕТР. При этом коэффициенты линейного тренда температуры во всех случаях положительны.

Безусловно, теоретический и практический интерес вызывают оценки будущих изменений основных климатических показателей на рассматриваемой территории. С этой целью использовались результаты ансамблевых расчетов по 40 климатическим моделям выполненных для 4-х основных сценариев проекта СМIP6: ssp126, ssp245, ssp370, ssp585. Согласно современной тенденции увеличения концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере, наиболее вероятным сценарием является ssp245. Расчеты выполнены как в целом для периода 2021-2100 гг., так и последовательно по 20-летним подпериодам: 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080 и 2081-2100 гг.

Анализ показал, что в зимний период потепление будет происходить более высокими темпами, чем в летний. По наиболее вероятному сценарию ssp245 (радиационный форсинг составит 4,5 Вт/м<sup>2</sup>) в заключительный 20-и летний период 21 века (2081-2100 гг.) по сравнению с 2021-2040 гг. повышение температуры воздуха по сезонам и за год составит соответственно: 2,9°C (зимой), 2,4°C (весной), 2,1°C (осенью) и 2,4°C (за год). Более высокие темпы потепления ожидаются в случае осуществления наиболее жесткого сценария (ssp585), при котором радиационный форсинг составит 8,5 Вт/м<sup>2</sup>. Однако его реализация маловероятна. В этом случае в конце столетия годовая температура в Казани возрастает на 5,5°C, а в зимний период на 6,6°C.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 22-27-20080).

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год / М., 2023, 104 с.
2. Кондратьев К.Я. Глобальный климат / СПб., Наука, 1992. 359 с.
3. Переведенцев Ю.П., Верещагин М.А., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. Многолетние колебания основных показателей гидрометеорологического режима Волжского бассейна. Метеорология и гидрология. 2001. № 10. С. 16.
4. Переведенцев Ю.П., Верещагин М.А., Наумов Э.П., Шанталинский К.М., Николаев А.А. Региональные проявления современного потепления климата в тропо-стратосфере Северного полушария. Известия РАН. Серия географическая. 2005. № 6. С. 6-16.
5. Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В., Аухадеев Т.Р. Климатические изменения в Приволжского федеральном округе в XIX-XXI веках. Метеорология и гидрология. 2020. № 6. С. 36-46.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВЫХ ЩИТОВ СЕВЕРНОГО ПОЛУШАРИЯ В СЛЕДУЮЩИЕ 100 ТЫСЯЧ ЛЕТ

*Плосков А.Н.<sup>1,2</sup>, Елисейев А.В.<sup>1,2</sup>, Мохов И.И.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
info@rector.msu.ru

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, ifaran@ifaran.ru

Развитие численных моделей Земной климатической системы (ЗКС) в последние десятилетия включает учет в них инерционных ледовых щитов [1-4]. Учёт таких инерционных компонент может привести как к формированию новых обратных связей [5], так и проявлению мультистабильности в ЗКС [1]. Режим ледовых щитов является значимым интегральным индикатором критического уровня изменений климата [6, 7]. В данной работе представлены результаты анализа проведенных ансамблевых расчётов с моделью динамики ледовых щитов для последнего ледникового цикла и для будущих 100 тысяч лет.

В работе использовалась модификация двумерной изотермической по вертикали модель ледовых щитов IceBern2D [8]. С моделью поставлены численные эксперименты для последних 128 тысяч лет с продолжением на 100 тыс. лет в будущем. В численных экспериментах с моделью задавался начальный уровень океанов на 7 м выше относительно современного, с отсутствием ледовых щитов в Северном полушарии (это примерно соответствует состоянию ЗКС 128 тыс. л.н (лет назад)). В контрольном численном эксперименте климат прошлого задавался с использованием данных содержания  $\delta^{18}\text{O}$  в ледовых кернах с антарктической станции EPICA Dome C, современного распределения приповерхностной температуры  $T$  и осадков  $P$  по данным реанализа ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels-preliminary-back-extension?tab=form>) и распределения этих переменных в последнем ледниковом максимуме (ПЛМ) по результатам расчетов с моделью IPSL (см. [7]). Для будущих 100 тыс. лет климат задавался по результатам расчетов с климатической моделью Climber-2.3 при сценарии антропогенных воздействий в результате сжигания 3000 ГтС в последующие несколько сот лет и естественных воздействий из-за изменения параметров орбиты Земли, что сопровождается увеличением глобальной температуры более чем на 5 °C [9].

Были проведены также численные эксперименты, в которых к изменению  $T$  и  $P$  добавлены возмущения в виде: а) синусоиды с периодом 5000 лет и с амплитудой 50 % (~5°C) от максимальной разности соответствующей переменной между современным периодом и ПЛМ б) в виде нормально распределенного белого шума с нулевым средним и стандартным отклонением, равным 40% от указанной максимальной разности.

В контрольном численном эксперименте модель реалистично воспроизводит изменение уровня океанов в последнем ледниковом цикле. Наиболее заметные различия с результатами палеореконокструкций отмечены для начала анализируемого периода. Это можно связать с влиянием начальных условий. Согласно проведенным расчетам во время последнего ледникового максимума уровень мирового океана в модели был ниже современного на 113 м. Вклад щитов и ледников Южного полушария и изменение уровня океана из-за увеличения плотности морской воды в данной работе не учитываются [10] Это согласуется с данными палеореконокструкций. Модель также хорошо воспроизводит пространственное распределение высоты ЛЩ в современный период и в ПЛМ.



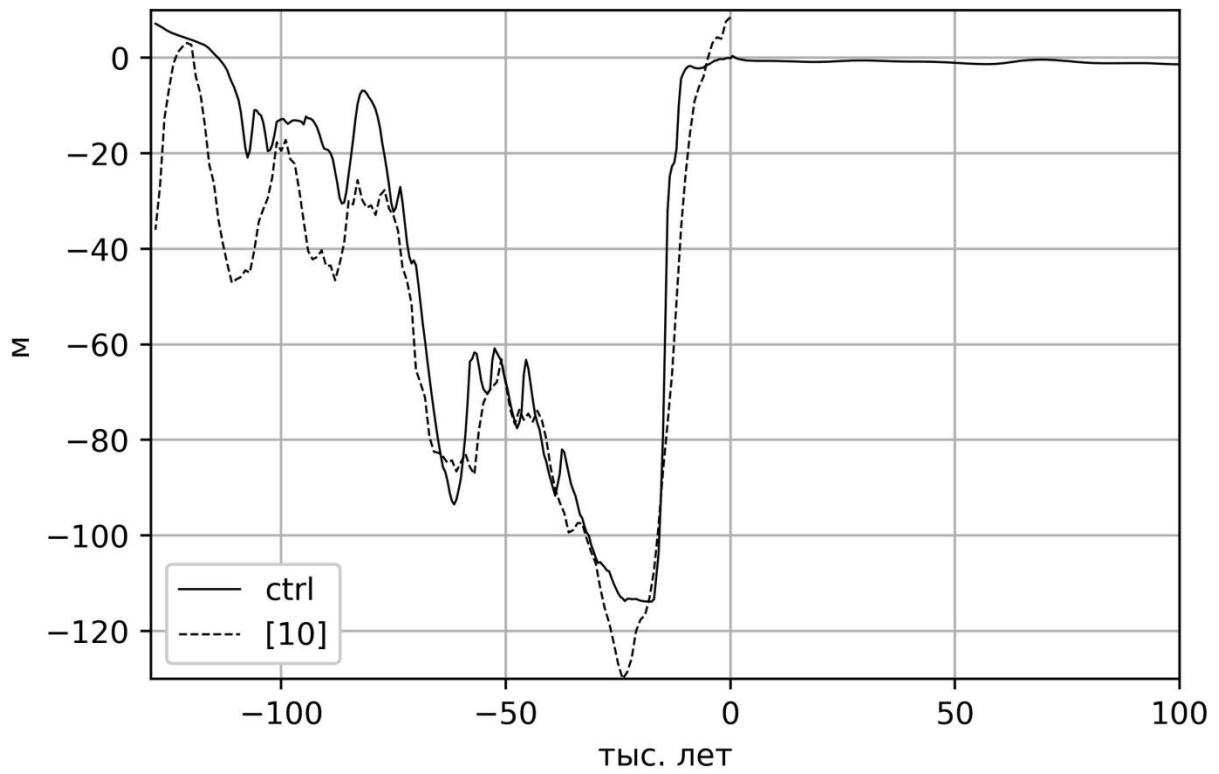


Рисунок 1. Изменение глобального уровня мирового океана в контрольном эксперименте с модель (ctrl) в сравнении с данными палеорекострукции [11].

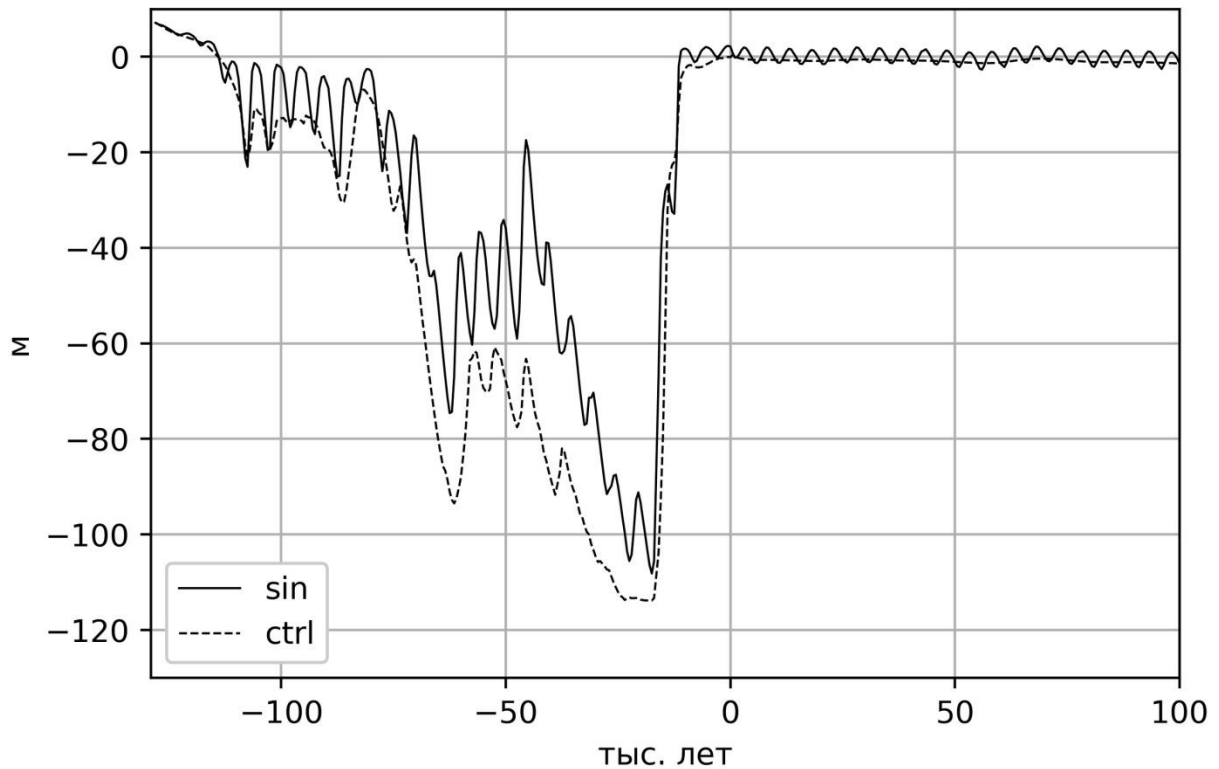


Рисунок 2. Изменение уровня океана в численном эксперименте с синусоидальным возмущением (sin) в сравнении с контрольным численным экспериментом (ctrl).

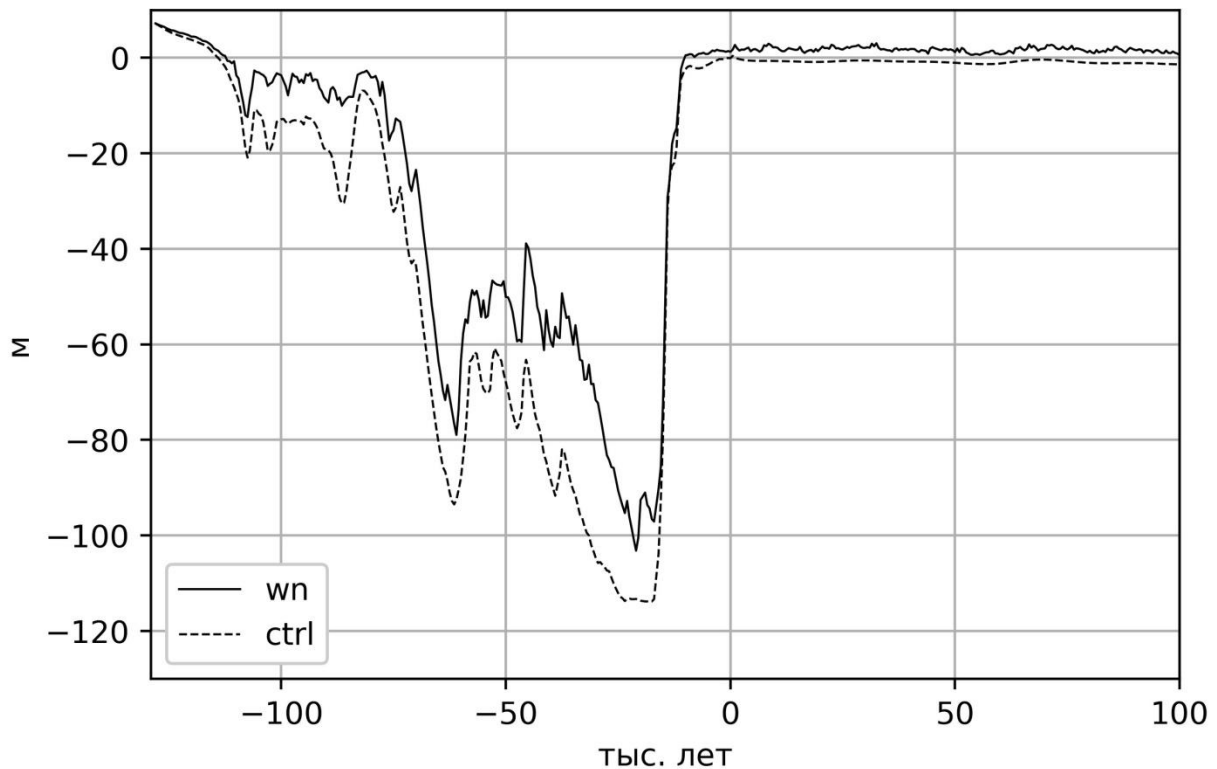


Рисунок 3. Изменение уровня океана в численном эксперименте с возмущением в виде белого шума (wn) в сравнении с контрольным экспериментом (ctrl).

Согласно результатам численных экспериментов с возмущениями, результаты которых представлены на рис. 2 и 3, существенно изменяется уровень мирового океана в последнем ледниковом цикле. Особенно заметно увеличение уровня мирового океана в период 40-60 тыс. лет назад (MIS3), когда конфигурация орбиты Земли была близка к пороговой для выхода из режима оледенения.

В будущем, однако, подобные возмущения не сказываются принципиально на динамике ледовых щитов - она получена близкой к результатам контрольного численного эксперимента. Вариации уровня океана при всех возмущения отличаются от соответствующих изменений в контрольном эксперименте не более чем на 2 м. Это может быть связано с изотермичностью по вертикали используемой модели ледовых щитов. Добавление модуля термофизики в модель может увеличить чувствительность ледовых щитов к потеплению.

1. Calov R., Ganopolski A. Multistability and hysteresis in the climate-cryosphere system under orbital forcing // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32 (21). L21717.

2. Berger A., Loutre M.F. Modeling the 100-kyr glacial-interglacial cycles // *Glob. Planet. Change.* 2010. V. 72 (4). P. 275-281.

3. Vizcaino M. Ice sheets as interactive components of Earth System Models: progress and challenges // *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change.* 2014. V. 5 (4). P. 557-568

4. Рыбак О.О., Володин Е.М. Использование энергволагодансовой модели для включения криосферного компонента в климатическую модель. Часть I. Описание модели и расчеты климатических полей приземной температуры воздуха и осадков // *Метеорология и гидрология.* 2015. (11). С. 33-45.

5. Fyke J., Sergienko O., Löfverström M., Price S., Lenaerts J.T.M. An overview of interactions and feedbacks between ice sheets and the Earth system // *Rev. Geophys.* 2018. V. 56 (2). P. 361-408.

6. Мохов И.И., Малышкин А.В. Аналитическая оценка критического уровня глобального потепления для перехода от роста к уменьшению массы Антарктического ледового щита // Доклады Академии наук. 2011. Т. 436 (3). С 397-400.

7. Плосков А. Н., Елисеев А. В., Мохов И. И. Ансамблевое моделирование динамики ледовых щитов в последнем ледниковом цикле // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2023. — Т. 510, № 1. — С. 99–105.

8. Neff B., Born A., Stocker T.F. An ice sheet model of reduced complexity for paleoclimate studies // Earth Syst. Dyn. 2016. V. 7 (2). P. 397-418.

9 Ganopolski A, Winkelmann R, Schellnhuber HJ. Critical insolation-CO2 relation for diagnosing past and future glacial inception. Nature. 2016 Jan 14;529(7585):200-3. doi: 10.1038/nature16494. PMID: 26762457.

10. Simms A.R., Lisiecki L., Gebbie G., Whitehouse P.L., Clark J.F. Balancing the last glacial maximum (LGM) sea-level budget // Quaternary Sci. Rev. 2019. V. 205. P. 143-153.

11. Spratt R.M., Lisiecki L.E. A Late Pleistocene sea level stack // Clim. Past. 2016. V. 12 (4). P. 1079-1092.

## СОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА В СИБИРИ

*Севастьянов В.В., Орлов П.Р., Ларионов В.О.*  
Томский государственный университет, meteo@mail.tsu.ru

Одной из основных глобальных проблем двадцать первого века является изменение климата и его последствия для окружающей природы. Если сам факт повышения температуры воздуха в различных районах Земного шара считается научно доказанным и признается большинством специалистов в мире, то причины, вызывающие эти изменения, являются предметом научных дискуссий. Мировое научное сообщество разделилось на два основных лагеря. Одни ученые считают, что происходящее изменение климата является следствием экономической и хозяйственной деятельности человека, приводящей к значительным выбросам и накоплению в атмосфере парниковых газов в результате сжигания ископаемого топлива. Другие утверждают, что происходящие климатические изменения находятся в пределах естественной изменчивости климата, наблюдались ранее и вызваны природными причинами, связанными с колебаниями основных климатообразующих процессов: приходом солнечной радиации, изменениями общей циркуляции атмосферы и влагооборота.

В научной литературе [1, 2, 4, 5] приводится большое количество информации об изменениях климата различных регионов России. Авторы используют различные периоды времени для оценки изменения климата от нескольких лет до нескольких десятилетий. Сильно различаются и масштабы (от глобальных или общероссийских до локальных) осреднения показателей изменчивости температурных условий. Различаются временные масштабы, интервалы осреднения климатических величин. Все это затрудняет проводить реальную оценку колебаний климата. Есть разночтения в том что принимать за климатическую норму температуры.

В качестве стандартного периода для оценки климатических показателей, характеризующих текущий или современный климат, по рекомендации Всемирной метеорологической организации используется период в 30 лет. Продолжительность такого периода получена из опыта и сравнительно хорошо удовлетворяет двум условиям: он достаточен для получения устойчивых средних характеристик погод и величин их вариаций и в то же время не слишком велик, чтобы можно было своевременно установить происходящие изменения климата от одного периода к другому.

Понимание региональных процессов, происходящих в климатической системе позволит оценить изменения в природной среде и может повысить точность прогнозирования грядущих изменений климатических условий по крайней мере на ближайшее десятилетие с учетом инерционных свойств климатической системы.

Целью исследования является изучение региональных изменений (колебаний) климата в пределах Западно-Сибирской равнины и примыкающей с востока Приенисейской Сибири. Были использованы климатические данные по 29 метеорологическим станциям [3], расположенным в различных природных зонах – от зоны тундры до степной зоны. Большинство станций в Сибири начали вести наблюдения только с 1930-х годов.

Для работы были использованы средние месячные и годовые значения приземной температуры воздуха за три тридцатилетних периода (1931–1960 гг. – первый период), 1961–1990 гг. – второй период, 1991–2020 гг. – третий период).

Обсуждение результатов. Средние годовые значения температуры воздуха (климатические нормы) за тридцатилетние периоды приведены в табл. 1.

Продолжительность изменения температурного режима наблюдалась за 90-летний период времени. Именно с 30-ых годов XX века стала развиваться сеть метеорологических станций в Сибири, что позволяет оценивать синхронные изменения климатических показателей температурного режима в различных природных зонах Сибири.

Следует отметить, что в пределах Сибирского региона изменение температурного режима за прошедшие 90 лет проходило по-разному в северных и южных районах.

В арктической зоне, в зоне тундры второй 30-летний период (1961–1990 гг.) отличался понижением температуры 0,9–1,2 °С. В таежной зоне похолодания во втором климатическом периоде по сравнению с первым не было. Наблюдалось повышение средних годовых температур воздуха от 0,1–0,2 °С в северной тайге до 0,3 °С в зоне южной тайги.

В зоне степи за тот же самый 30-летний период температура повысилась на более высокие значения 0,3–0,6 °С. В горных котловинах Алтае-Саянской горной страны (Кызыл) повышение температуры произошло на 1,5 °С. Отсюда следует вывод, что за период с 1961 по 1990 гг. тенденции колебаний температурного режима носили разнонаправленный характер: на севере наблюдалось похолодание, тогда как в центральных районах Сибири и на юге была тенденция повышения средних годовых температур (климатических норм).

Сравнение климатических норм средних годовых температур за второй (1961–1990 гг.) климатический период и третий период до 2020 г. позволило сделать следующие выводы. В арктической зоне произошло максимальное для Сибири потепление – на 1,6 °С в Салехарде и на 2,0 °С на острове Диксон. В таежной зоне рост средних годовых температур оказался тоже достаточно большим – от 1,1 °С (Колпашево) до 1,5 °С (Енисейск). В степной зоне отмечено повышение средних годовых температур только на 1,0–1,1 °С на станциях Усть-Каменогорск и Шира. В горных котловинах температура выросла на 1,9 °С. В итоге получилось, что в третий климатический период (с 1991–2020 гг.) потепление наблюдалось на всей территории Западной и Приенисейской Сибири. Однако максимальное потепление отмечалось в арктической зоне и в тундре. К югу темпы роста температур заметно меньше.

Изменение средних годовых температур воздуха является интегральным показателем, сглаживающим ее сезонные и средние месячные колебания. В табл. 1 приведены в качестве примера средние месячные и средние годовые значения температуры воздуха на станциях, расположенных на севере и юге Западной Сибири за различные 30-летние климатические периоды. Анализ показал, что на севере (Салехард) климатический период с 1961 по 1990 гг. отличался наиболее значительным похолоданием по сравнению с предыдущим периодом во все месяцы холодного периода и в осенне-весенний период, а также в летние месяцы.

В таежной зоне изменение температурного режима носит менее выраженный характер. Только в январе и феврале зафиксировано понижение температуры, а в ноябре и декабре отмечалось повышение температуры. Произошло понижение средних температур воздуха весной (апрель, май) и осенью (сентябрь, октябрь). В другие месяцы произошло повышение температуры воздуха. В результате на станции Александровское (таежная зона) произошло похолодание в меньшей степени, чем на станции Салехард (лесотундра).

Колебания температурного режима в зоне степей (станция Усть-Каменогорск) существенно отличается от территорий, расположенных к северу. В период 1961–1990 гг. на широтах 50–52 °с.ш. наблюдался рост средних месячных температур воздуха во все сезоны года, за исключением периода с августа по октябрь, когда наблюдалось незначительное похолодание.

**Таблица 1. Многолетние средние месячные и годовые температуры воздуха (°С) в различные климатические периоды на станциях Западной Сибири**

Месяц, год	Климатические периоды, годы		
	1932–1960	1961–1990	1991–2020
<b>Салехард 66,5 °с.ш., 66,6 °в.д., зона лесотундры</b>			
Январь	-22,0	-24,8	-23,1
Февраль	-22,5	-23,6	-22,0
Март	-18,7	-16,2	-14,2
Апрель	-7,7	-9,9	-7,3
Май	-0,6	-1,8	0,4
Июнь	8,6	7,9	10,3
Июль	14,0	14,4	15,0
Август	11,9	10,8	11,6
Сентябрь	5,5	5,1	5,7
Октябрь	-3,1	-4,9	-2,7
Ноябрь	-13,7	-15,6	-14,5
Декабрь	-20,6	-20,7	-19,9
Год	-5,7	-6,6	-5,0
<b>Бор (Подкаменная Тунгуска) 61,6 °с.ш., 90,0 °в.д., зона тайги</b>			
Январь	-24,1	-24,8	-23,2
Февраль	-21,3	-22,6	-19,2
Март	-13,6	-12,3	-9,6
Апрель	-2,4	-3,5	-1,3
Май	5,1	4,4	5,9
Июнь	13,6	13,4	15,2
Июль	17,3	18,1	18,3
Август	13,6	13,9	14,3
Сентябрь	7,5	7,0	7,0
Октябрь	-2,2	-3,0	-1,6
Ноябрь	-16,6	-14,6	-14,6
Декабрь	-24,1	-21,9	-21,5
Год	-3,9	-3,8	-2,5
<b>Усть-Каменогорск 50,0 °с.ш., 82,6 °в.д., зона степи</b>			
Январь	-17,3	-15,9	-15,3
Февраль	-16,3	-15,9	-13,3
Март	-8,2	-8,0	-5,5
Апрель	4,7	5,0	7,0
Май	13,3	13,5	14,1
Июнь	18,6	18,6	19,2
Июль	20,5	20,6	20,5
Август	18,4	18,0	18,5
Сентябрь	12,3	12,2	12,3
Октябрь	5,1	4,5	5,4
Ноябрь	-7,2	-5,5	-4,7
Декабрь	-14,0	-13,5	-11,6
Год	2,5	2,8	3,9

Третий климатический период (1991–2020 гг.) оказался наиболее теплым по сравнению с предыдущими 30-летиями. Причем повышение температуры в зоне тундры и в таежной зоне в большинстве месяцев превысили величину ее понижения за предыдущий период. В степной зоне Западной Сибири на протяжении 90 лет наблюдалась тенденция повышения средних месячных и годовых температур воздуха.

Региональные исследования изменения климатических условий являются важным инструментом для выявления причин колебаний температурного режима. Средние глобальные или средние российские изменения не могут достаточно полно объяснить природу климатических изменений в различных регионах России и планеты Земля в целом. В разных районах Сибири отличаются не только значения трендов температуры по величине, но оказываются противоположными по тенденции.

Следует учитывать важную роль влияния крупномасштабных орографических факторов на изменчивость приземной температуры воздуха. В частности, в обширных горных котловинах в Туве, в Горном Алтае темпы роста температуры значительно выше, чем на равнинных территориях и в условиях нижней тропосферы. В значительной мере темпы изменения температуры зависят от величины показателя фактора степени котловинности.

Изменение средних годовых температур приземного воздуха является интегральным показателем. Важным дополнительным фактором, способствующим пониманию причин колебаний климата, является рассмотрение колебаний температуры воздуха по сезонам года или по отдельным месяцам. В условиях Сибири с резко континентальным климатом в разные периоды года существенно меняются условия общей циркуляции атмосферы.

Исследования показали, что существуют статистически значимые зависимости темпов изменения температурного режима от типов циркуляции, от повторяемостей числа дней с циклонами и антициклонами и другими циркуляционными факторами.

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. 2014. – Москва, ФГБУ НИЦ «Планета», 58 с.

2. Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенций Росгидромета). – Санкт-Петербург; Саратов: Амирит, 2020. – 120 с.

3. Справочно-информационный портал «Погода и климат». 2004–2023. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php> (дата обращения 15.05.2023).

4. Харюткина Е.В. Тенденции изменения экстремальности климата Западной Сибири в конце XX – начале XXI веков / Е.В. Харюткина, С.В. Логинов, Е.И. Усова [и др.] // Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. – [Томск], 2019. URL: [http://downloads.igce.ru/journals/FAC/FAC\\_2019/FAC\\_2019\\_2/Kharyutkina\\_E\\_V\\_et\\_al\\_FAC\\_2019\\_2.pdf](http://downloads.igce.ru/journals/FAC/FAC_2019/FAC_2019_2/Kharyutkina_E_V_et_al_FAC_2019_2.pdf) (дата обращения 15.05.2023).

5. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2022. – 124 с.



## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ЭПИЗОДОВ РОСТА ПЛОЩАДИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ С ОСОБЕННОСТЯМИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ

*Томишин О.А., Соловьев В.С.*

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
г. Якутск, tomshinoa@gmail.com

В последние десятилетия потепление климата приводит к формированию более благоприятных условий для возникновения и развития природных пожаров как в региональном, так и в глобальном масштабе [1]. Восточная Сибирь (ВС) является самым пожароопасным регионом России на территории которого ежегодно регистрируются большое количество лесных пожаров [2]. Возникновение и скорость распространения лесных пожаров зависят от нескольких факторов: наличия горючего материала, погодных-климатических условий и источников возгорания. В данной работе проведено исследование связи эпизодов роста площади лесных пожаров в восточной Сибири с особенностями пространственно-временной динамики атмосферы за период 2001-2021 гг. по данным атмосферного реанализа и спутниковых наблюдений.

Для анализа пожарной активности использованы данные спектрорадиометра MODIS (продукты MOD14A1 C6.1 и MCD64A1 C6) [3, 4], установленного на спутниках Terra и Aqua. Продукт MOD14A1 C6.1 содержит ежедневные сведения об очагах активного горения с пространственным разрешением 1 км. Продукт MCD64A1 C6.1 содержит сведения о пройденных огнём территориях с пространственным разрешением 500 м. Для определения типа растительности на повреждённых огнём участках использовались данные о типах подстилающей поверхности из продукта MODIS MCD12Q1 C6 [5].

Среднесуточные значения аномалий геопотенциальной высоты на уровне 500 гПа ( $\Delta Z_{500}$ ), меридиональной компоненты ветра на уровне 300 гПа ( $V_{300}$ ), аномалий температуры приземного воздуха ( $\Delta T$ ), аномалий осадков ( $\Delta P$ ) получены из NCEP-DOE реанализа [6], пространственное разрешение данных  $2.5^\circ$ . Ежедневные данные об облачном покрове получены из продукта MODIS MOD08D3 C6.1 [7]. Данные по индексу пожароопасности по метеоусловиям (FWI) получены из Global Fire WEather Database (GFWED, <https://data.giss.nasa.gov/impacts/gfwed/>). Аномалии рассчитывались как отклонения значений от среднесуточных, рассчитанных за период 1980-2010 гг.

Для обнаружения и анализа событий быстрого роста площади пожаров (БРП) в работе используются модифицированные варианты методов, описанных в работе [8]. На первом этапе осуществлялся отбор очень крупных гарей пожаров с площадью  $>10$  тыс. га, тип растительности которых относился к лесным классам. Затем для каждой гари на основе спутниковых данных об изменении площадей пожаров в течение периода горения с помощью приближения о равномерном, круговом распространении пожаров, находилась ежедневная скорость продвижения фронта пожара. После этого, осуществлялся отбор событий БРП по каждой гари, определяемых как день, в течение которого скорость распространения фронта превышала 480 м/день. Далее для каждого события находились значения метеорологических параметров в диапазоне  $\pm 50^\circ$  по долготе и  $\pm 30^\circ$  по широте относительно центра соответствующей гари за период  $\pm 20$  дней относительно даты события. На заключительном этапе осуществлялось усреднение по относительному дню по всем событиям.

Всего за рассмотренный период на территории ВС было обнаружено 1249 событий, большинство из которых пришлось на летние месяцы июнь-июль-август (рис. 1). На

рис. 2 представлены усреднённые по относительно дню карты пространственного распределения  $\Delta Z500$  (рис. 2а) и  $\Delta V300$  (рис. 2б) по всем событиям. Как видно из рис. 1а, примерно за 8 дней до нулевого дня начинает нарастать величина  $\Delta Z500$ , которая достигает своего максимума примерно в  $-2-0$  день относительно даты события. Аномалия  $Z500$  в день максимума имеет чётко выраженную округлую форму, с максимумом, расположенным близко к относительному центру событий. В усреднённом пространственном распределении меридионального ветра  $V300$  (рис. 2б) примерно за 4-6 дней до нулевого дня начинает проявляться дипольная конфигурация, которая наиболее ярко проявляется в  $-2-0$  день относительно даты события. Положительные значения скорости меридиональной компоненты ветра расположены западнее относительного центра событий, отрицательные – восточнее. Характер наблюдаемых картин в  $\Delta Z500$  и  $V300$  свидетельствует о том, что значительная часть событий БРП наблюдается на фоне интенсификации антициклонической циркуляции. Это подтверждается вариациями облачного покрова, приземной температуры и осадков (рис. 3) – в день событий БРП наблюдается уменьшение облачности и количества осадков, сопровождаемые ростом приземной температуры воздуха и, как следствие, ростом пожароопасности и интенсификацией очагов горения.

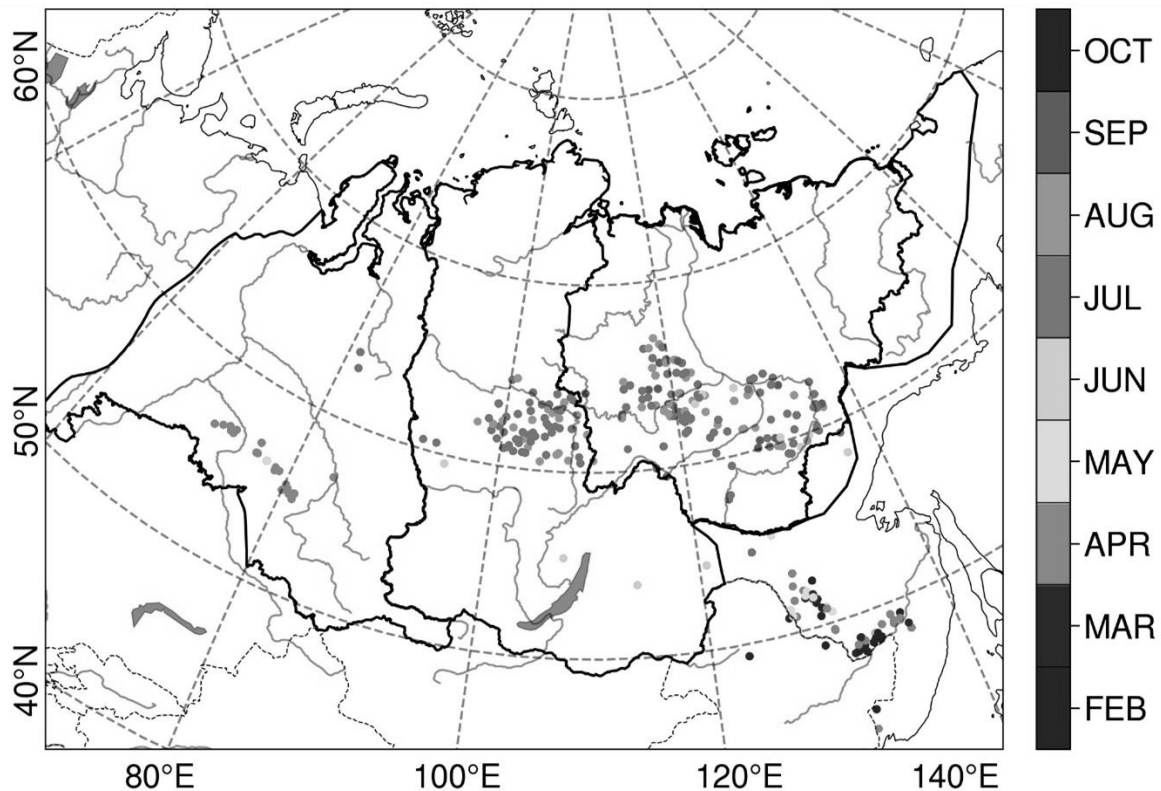


Рисунок 1. Карта пространственного распределения обнаруженных событий.

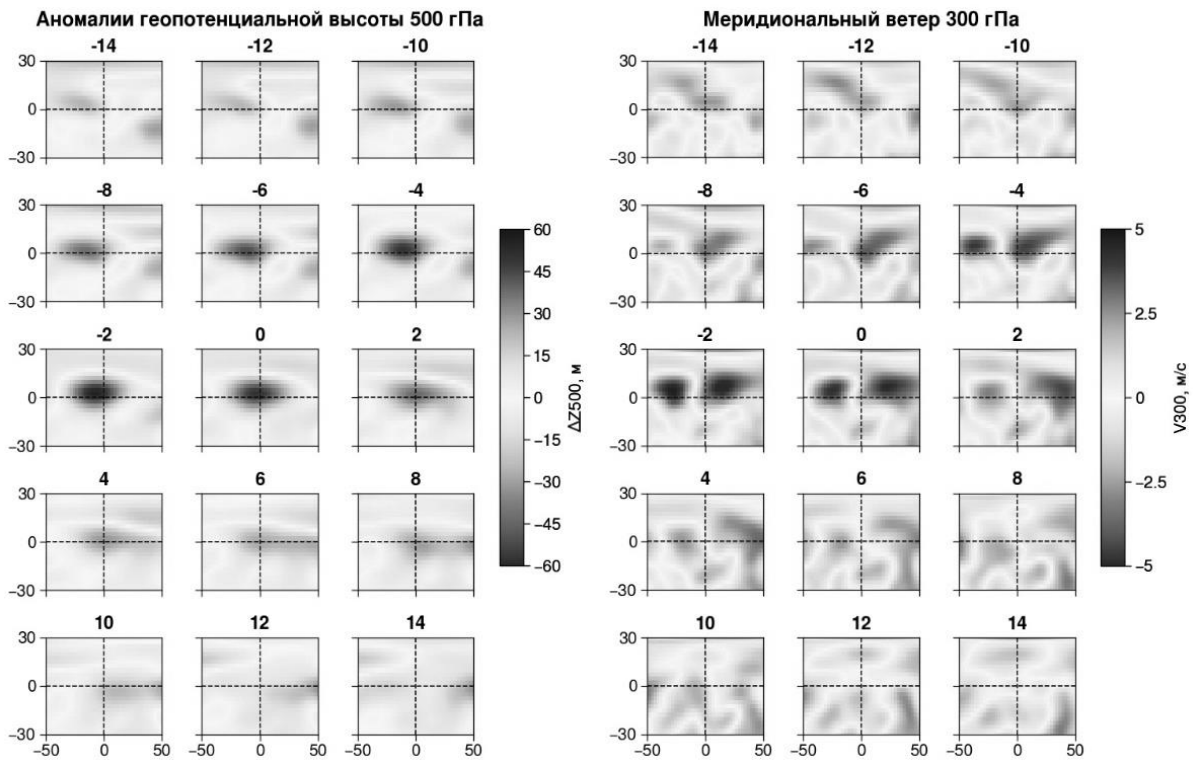


Рисунок 2. а) усреднённые карты пространственного распределения  $\Delta Z_{500}$  по относительным дням от дат событий; б) то же самое, но для  $V_{300}$ .

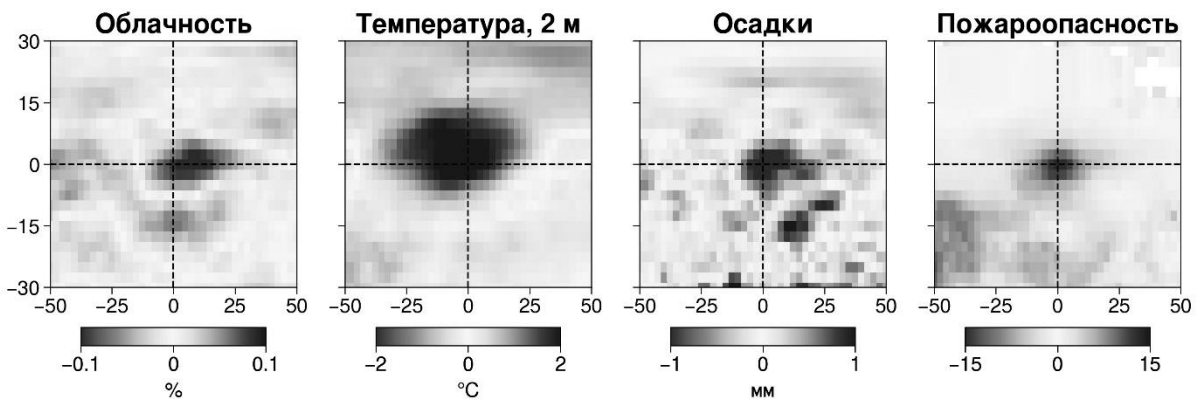


Рисунок 3. Усреднённые карты пространственного распределения аномалий облачности, приземной температуры, осадков и индекса пожароопасности FWI в день "0".

В работе проведён предварительный анализ метеорологических условий во время событий быстрого расширения площади лесных пожаров в Восточной Сибири.

События БРП наблюдаются на фоне характерных метеоусловий – положительных аномалий  $Z_{500}$ , дипольной картины циркуляции в меридиональной компоненте ветра  $V_{300}$ , положительных аномалий температуры приземного воздуха, отрицательных аномалий осадков и, как итог, общей повышенной пожароопасности. Наблюдаемая картина соответствует антициклонической циркуляции.

Метеорологические параметры начинают нарастать/снижаться относительно среднесуточных значений за 4-8 дней до событий, достигают максимума/минимума примерно в день события и постепенно возвращаются к среднесуточным значениям. Это

обстоятельство может быть использовано при прогнозировании возникновения подобных событий.

Работа выполнена в рамках государственного задания (номер государственного учёта НИОКТР 122011700172-2).

1. Abatzoglou J.T., Williams A.P., Barbero R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices // *Geophysical Research Letters*. 2019. V. 46. P. 326-336. doi: 10.1029/2018GL080959.

2. Tomshin O.A., Solovyev V.S. Spatio-temporal patterns of wildfires in Siberia during 2001–2020 // *Geocarto International*. 2021. doi: 10.1080/10106049.2021.1973581.

3. Giglio, L., Schroeder, W., and Justice, C. O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products // *Remote Sensing of Environment*. 2016. № 178. P. 31-41.

4. Giglio L., Boschetti L., Roy D.P., Humber M.L., Justice C.O. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 217. P. 72–85.

5. Friedl M., Sulla-Menashe D. Data from: MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua land cover type yearly L3 global 500m SIN grid V006” (dataset). - NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2020.

6. Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S-K, Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G. L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002. P. 1631-1643.

7. MODIS Atmosphere Science Team. MOD08\_D3 MODIS/Terra Aerosol Cloud Water Vapor Ozone Daily L3 Global 1Deg CMG. - NASA Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System, 2015.

8. Jain P., Flannigan M. The relationship between the polar jet stream and extreme wildfire events in North America // *Journal of Climate*. 2021. Vol. 34. № 15. P. 6247–6265.

## ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ РАЗВИТИИ ВОЗГОРАНИЙ ОТ ГРОЗ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ЗА ПЕРИОД 2016–2021 ГГ.

*Харьюткина Е.В.<sup>1,2</sup>, Морару Е.И.<sup>1</sup>, Пустовалов К.Н.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
kh\_ev@imces.ru

<sup>2</sup>Томский государственный университет

В последние десятилетия для сибирских лесов отмечается увеличение частоты лесных пожаров и площади выгоревших участков, вызванное изменением климата [1]. К наиболее существенным факторам, влияющим на возникновение и развитие лесных пожаров, относятся климатические изменения, человеческая деятельность, а также тип растительного покрова [2]. Несмотря на то, что большинство лесных пожаров происходит из-за антропогенной деятельности, преобладающим источником возгораний во многих бореальных и арктических регионах является молния [3]. Современные изменения климата могут приводить к изменению режима молниевой активности как фактора пожароопасности в глобальном масштабе [4]. Особое внимание необходимо уделять пожарам, вызванным сильными грозами, при которых практически не выпадают атмосферные осадки [5]. Такое явление носит название «сухие» грозы, они связаны с изолированными кучево-дождевыми облаками, возникающими в тропической воздушной массе. «Сухие» грозы не всегда удаётся обнаружить, существующие методики диагноза и прогноза гроз с использованием информации и метеорологических радиолокаторов не дают возможности разделения гроз на «сухие» и «влажные» [6]. Согласно [5], для выявления случаев с «сухой» грозой для северо-запада США использовалось пороговое значение общего количества осадков за сутки: 1/100 дюйм (0,25 мм) и 1/10 дюйм (2,5 мм). Указанные пороги применялись при исследовании явлений «сухих» гроз для разных регионов земного шара (Канада, Аляска, страны Европы). Согласно [5], что важными параметрами для прогноза этих событий является содержание влаги в приземном и пограничном слоях атмосферы, а также устойчивость атмосферы.

Поэтому на фоне существующих изменений климата и малого количества исследований в этом направлении для Западной Сибири (ЗС) важно знать пороговые оценки метеовеличин при возникновении лесных пожаров от гроз (LIWs).

Целью работы является исследование изменчивости метеорологических условий, предшествующих возникновению пожаров от «сухих» гроз в регионах Западной Сибири за 2016 - 2021 гг.

Под территорией Западной Сибири (45–75° с.ш., 60–95° в.д.) понималась территория, охватывающая Западно-Сибирскую равнину и северную часть Казахстана (далее ЗС). Расчеты проводились за тёплый сезон года (с мая по сентябрь) за период 2016–2021 гг. Отдельно рассматривались: северная часть ЗС (65–75° с.ш.) – зона тундры и многолетнемерзлых грунтов, центральная часть ЗС (55–65° с.ш.) – зона смешанных лесов и переувлажненных территорий, и южная часть ЗС (45–55° с.ш.) – зона степей и лесостепей.

В качестве характеристики лесных пожаров использовались данные об активных очагах возгораний (тепловых аномалиях / hotspots) из архива «Fire Information for Resource Management System (FIRMS)» Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) с суточным временным разрешением и пространственным разрешением 1 км<sup>2</sup>×1 км<sup>2</sup> (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>). За один пожар принимались все хотспоты, обнаруженные в радиусе 2 км относительно первого по времени появившегося хотспота. Данные о молниевых разрядах получены из Всемирной грозопеленгационной сети (WWLLN). Возникновение лесного пожара, вызванного молнией, определялось при

условии, что расстояние между первым появившемся хотспотом и молниевым разрядом не превышает 10 км (наличие хотя бы одного молниевых разряда в радиусе 10 км от хотспота) и в течение 10 дней до пожара. Выбор такого радиуса основан на точности данных WWLLN [7]. Методика расчета вероятности возникновения LIWs подробно описана в работе [8]. В данном случае учитывались только случаи с вероятностью более 80%. Далее по пороговому значению осадков отбирались случаи «сухих» гроз: суммарное за сутки количество выпавших осадков в ячейке  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  не должно быть более 2,5 мм (рисунок 1).

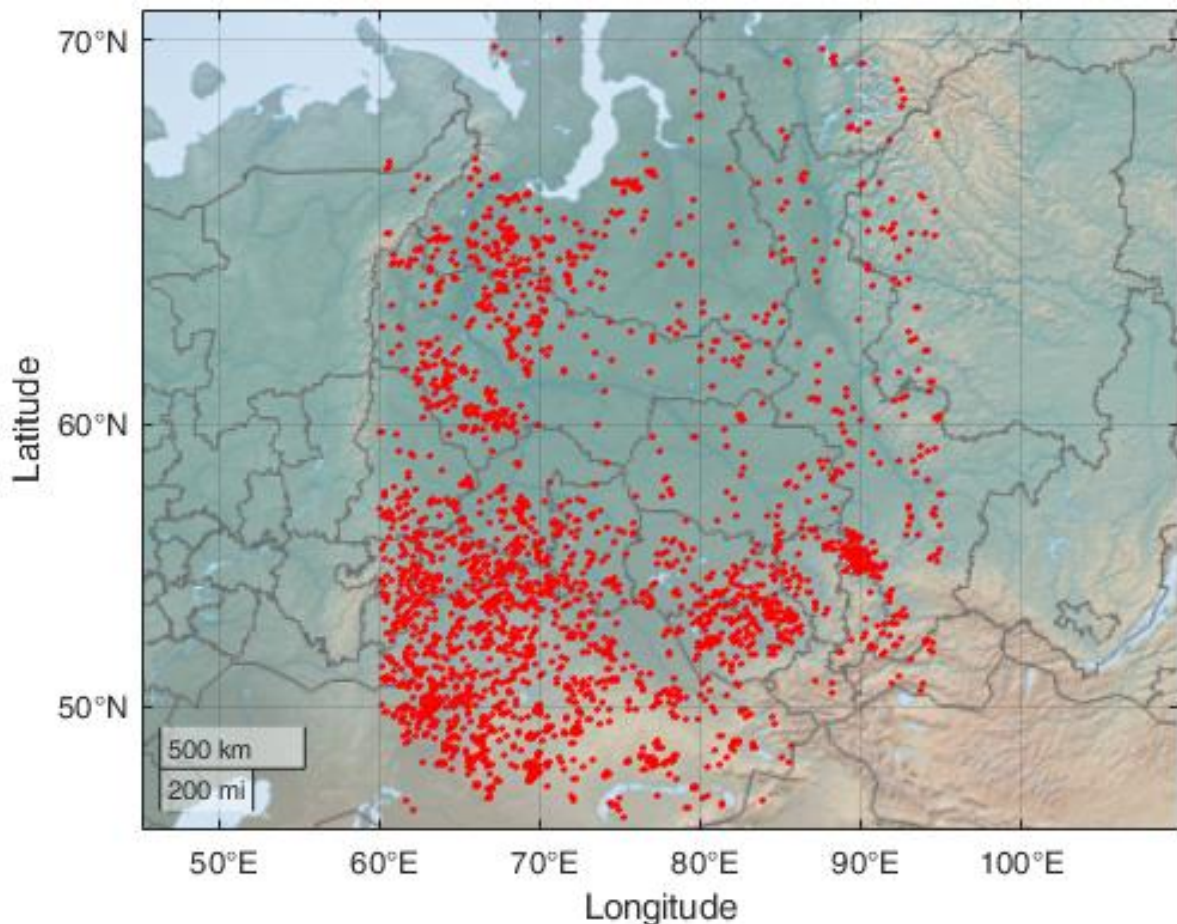


Рисунок 1. Расположение очагов возгораний от «сухих» гроз в Западной Сибири за тёплый сезон за период 2016–2021 гг.

На следующем шаге для полученной выборки по данным реанализа ERA5 с пространственным разрешением  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  подготавливались суточные значения следующих метеорологических величин: температура воздуха на высоте 2 м ( $T$ , К), относительная влажность воздуха на 1000 гПа ( $f$ , %) и горизонтальная скорость ветра на высоте 10 м ( $V$ , м/с). Представленные на рисунке 2 зависимости от метеопараметров, наблюдающихся при возникновении пожаров по причине «сухих» гроз, позволили выявить следующие особенности. Диапазон изменений всех метеорологических величин максимальных при LIWs в центральной части ЗС, а минимальный – в северной.

В среднем пожары от «сухих» гроз возникают при скоростях ветра 3–4 м/с во всех районах ЗС, относительной влажности воздуха от 45% до 65% в северных и южных районах, соответственно, и при температуре от 285 К (11,9°C) в центре и на юге ЗС до 295 К (16,9°C) на севере ЗС.



Максимальные значения температуры и относительной влажности воздуха наблюдаются за 5 суток до пожара на юге, за 3-е суток в центре, и за 3–5 суток на севере ЗС, а к моменту возникновения пожара  $T$  и  $f$  резко уменьшаются (рисунок 3).

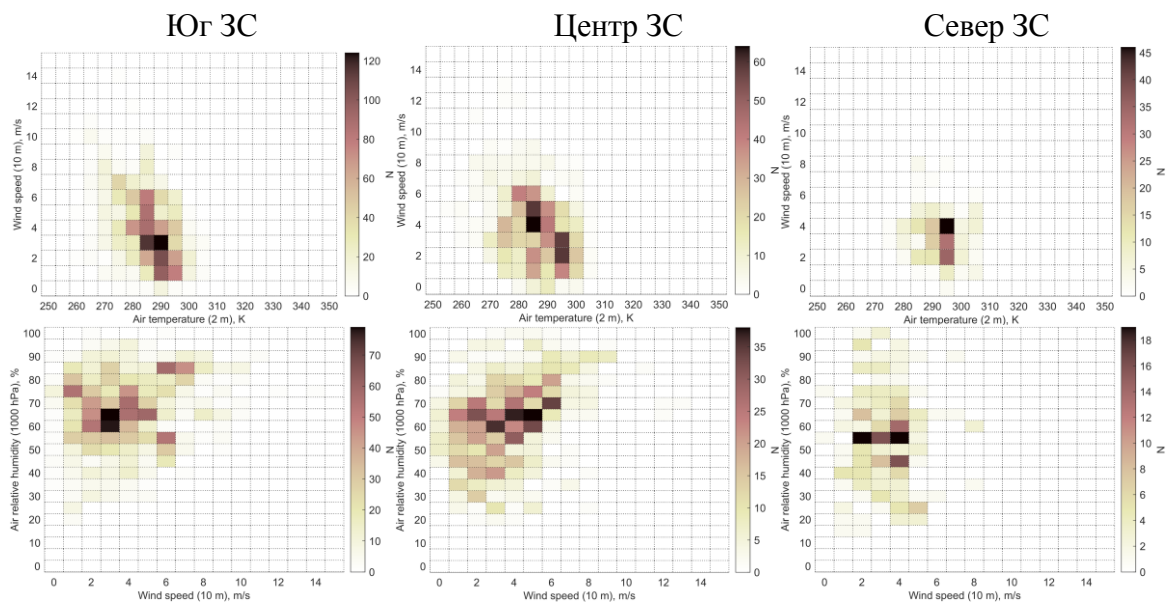


Рисунок 2. Изменение метеопараметров при возникновении пожаров из-за «сухих» гроз в районах Западной Сибири за тёплый сезон за период 2016–2021 гг.

При этом стоит отметить, что для относительной влажности в центральной части ЗС отмечается наибольший диапазон изменчивости величины, а для температуры воздуха – наименьший (рисунок 3). К тому же, возгорания от «сухих» гроз происходят при увеличении скорости к моменту возникновения пожара (начиная за 4–5 суток).

Таким образом, выявлено, что за 3–5 суток до вероятного возгорания от «сухих» молний в разных широтных зонах Западной Сибири наблюдается наибольшая изменчивость основных метеорологических величин, при этом на севере необходимы более засушливые условия, чем на юге и в центральной части.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ), проект № 22-27-00494, <https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00494>.

1. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson K. J. Wildfires dynamics in Siberian larch forests // *Forests*. – 2016. – Т. 7. – №. 6. – С. 125.
2. Hantson S. et al. The status and challenge of global fire modelling // *Biogeosciences*. – 2016, Vol. 13. – P. 3359–3375.
3. Chen Y., Romps D.M., Seeley J.T., Veraverbeke S., Riley W.J., Mekonnen Z.A., Randerson J.T. Future increases in Arctic lightning and fire risk for permafrost carbon // *Nat. Clim. Chang.* – 2021. – Vol. 11. – P. 404–410.



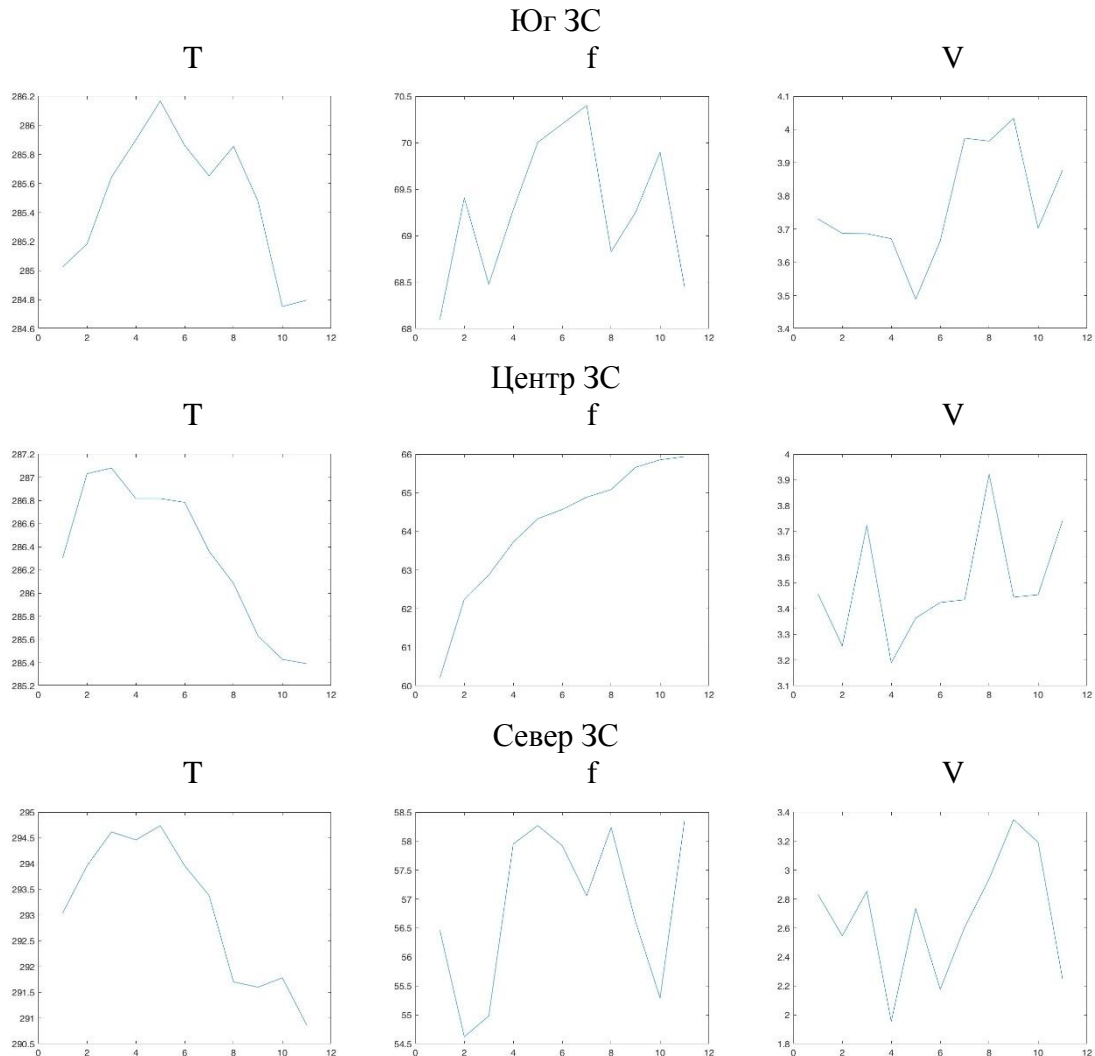


Рисунок 3. Метеорологические условия, предшествующие возникновению LIWs за 0 – 10 суток (0 – день пожара) в районах Западной Сибири в тёплый сезон за 2016–2021 гг.

4. Кондратьев К.Я., Григорьев А.А. Лесные пожары как компонент природной экодинамики // *Оптика атмосферы и океана*. – 2004. – Т.17, № 4. – С. 279–292.

5. Rorig M. L., Ferguson S.A. Characteristics of lightning and wildfire ignition in the Pacific Northwest // *J. Appl. Meteor.* – 1999. – Vol. 38. – P. 1565–1575.

6. Дорофеев В.В., Кузнецов И.Е., Степанов А.В., Щербинин В.А., Левченко А.В. Модели диагноза и прогноза пожароопасной ситуации в районах лесных массивов, обусловленной «Сухими» грозами // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. – 2014. – Т.1. – № 1(5). – С. 142–146.

7. Pérez-Invernón F.J et al. Lightning-ignited wildfires and long-continuing-current lightning in the Mediterranean Basin: Preferential meteorological conditions // *Atmos. Chem. Phys.* – 2021. – Vol. 21. – P. 17529–17557.

8. Kharyutkina E., Pustovalov K., Moraru E., Nechepurenko O. Analysis of spatio-temporal variability of lightning activity and wildfires in Western Siberia during 2016–2021 // *Atmosphere*. – 2022. – V. 13. – № 669. – P. 1–16.

## ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ СИНХРОНИЗАЦИИ В ДИНАМИКЕ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В РАЙОНЕ НАИБОЛЬШЕГО ВЛИЯНИЯ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

*Чередько Н.Н.<sup>1,2</sup>, Волков Ю.В.<sup>1</sup>, Тартаковский В.А.<sup>1</sup>, Гуревич Д.А.<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет, atnik3@mail.ru, yvvolkov@mail.ru, trtk@list.ru, darya.volguntzova@yandex.ru

История климата представляет собой периоды, когда климатическая система Земли существовала в метастабильном состоянии в течение длительных интервалов времени, и периоды резких, быстрых переходов ее в другое состояние, так называемые критические точки в динамике климата. Знание их признаков и предикторов, с выходом на решение задач механизмов их формирования и региональные особенности, актуально и важно для моделирования и прогноза климата. Мировой океан является наиболее инерционным звеном климатической системы, аккумулирующим энергию внешних воздействий, но в энергоактивных зонах системы взаимодействия океана с атмосферой чувствительность к разного рода внешним воздействиям высока, и реакция на них запускает довольно быстрые изменения разного временного масштаба, в том числе и синоптического, во всей климатической системе.

В данной работе, в предположении, что от цикла к циклу солнечной активности (11-летние) меняется реакция центров действия атмосферы (ЦДА) Северной Атлантики (Исландский минимум и Азорский максимум) и, соответственно, перестраиваются поля метеорологических элементов, на формирование которых они оказывают непосредственное влияние, была проведена оценка пространственной структуры синхронизации динамики приземной температуры в разные циклы солнечной активности в зоне максимального влияния Северной Атлантики. Существенная глобальная климаторегулирующая роль процессов Северной Атлантики общепризнана [1], а колебания давления в ЦДА отражаются индексом Северо-Атлантического колебания (САК) [2]. К зоне их максимального влияния относим территории в секторе: от 20° до 90° с.ш., от 90° з.д. до 60° в.д. Данные измерений приземной температуры на метеостанциях этого сектора [2] за период 1961-2022 гг. (№№ 19-24 11-летние циклы солнечной активности, ветвь спада векового цикла, оценка по числам Вольфа [3]) послужили материалами исследования. Кластеризация рядов данных проводилась с использованием разработанного и реализованного в ИМКЭС СО РАН программного комплекса климато-экологического мониторинга (ПККЭМ) [4].

Самым интенсивным за рассмотренный период был цикл солнечной активности 1976-1986 гг. (нечетный), самым слабым – цикл 2008-2018 гг. (четный). Структура синхронизации динамики температуры в эти два периода существенно различается (рисунок 1). В период 2008-2018 г. более интенсивный в среднем за год Исландский минимум и близкий к среднему, хотя ослабленный, Азорский максимум соответствуют большей повторяемости положительных и высоких значений индекса САК в этом цикле (не учитываем аномально низкие значения САК зимой 2009-2010 гг. и в среднем за 2010 г.). Это соотносится с закономерностью динамики этого индекса в последние полтора века в связи с солнечной активностью: положительные значения САК преобладают в четные циклы солнечной активности, а отрицательные – в нечетные [5].

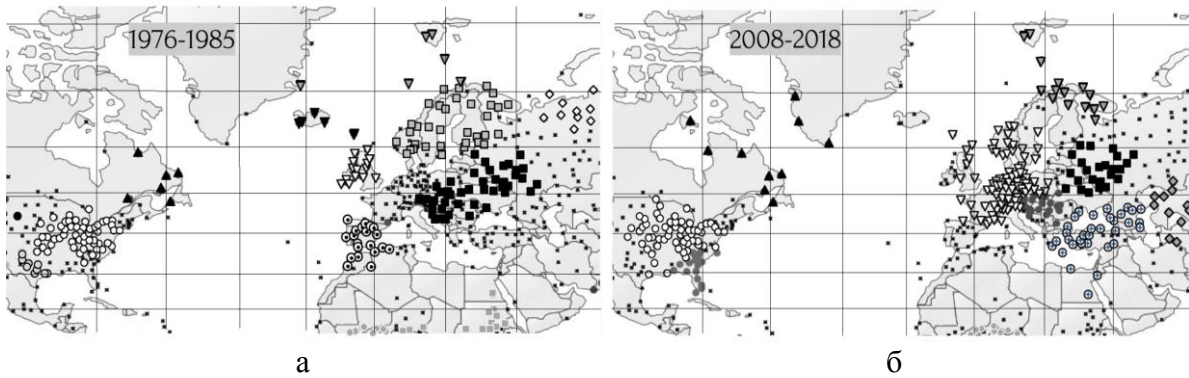


Рисунок 1. Структура синхронизации динамики приземной температуры в районе наибольшего влияния центров действия атмосферы Северной Атлантики в циклы солнечной активности наибольшей (а) и наименьшей (б) интенсивности. Одинаковым значком обозначены станции, изменения температуры на которых происходили синхронно. Станции, не вошедшие ни в один из кластеров, обозначены знаком “х”.

Режим положительной фазы САК характеризуется [6] усилением зональной циркуляции, смещением траекторий циклонов к северу. При этом, циклоны выходят на европейскую территорию в стадии своего максимального развития, что максимизирует переноса тепла и влаги на северную Европу и Скандинавию, где повышаются температура и осадки, особенно в зимний период. Отражением этих процессов является формирование в период цикла 2008-2018 гг. крупного кластера станций, включающего большую часть станций центральной и северной Европы, Скандинавии, где вследствие приведенных выше процессов изменения температуры происходили синхронно. Как известно, на период этого цикла пришлось рекордное уменьшение площади ледяного покрова летом и, соответственно, повышение температуры атлантических вод, что отразилось в синхронизации изменений температуры на станциях севера Скандинавского, Кольского полуостровов и на островах Шпицберген. Над южной Европой и Средиземноморским регионом вследствие более северных траекторий смещения циклонов в периоды положительного САК и ослабленного Азорского максимума в среднем за 2008-2018 гг. формируются более засушливые условия [7], а изменения температуры в большей степени зависят от местных условий, что выразилось в распаде класса станций на западе и юго-западе Средиземноморского региона. Также, при повышенном индексе САК увеличивается конвекция Лабрадорской воды [8], что сопровождается ее поверхностным охлаждением и переносом холодных континентальных масс воздуха с Канады [9] к Гренландии. Этот процесс способствовал здесь синхронизации полей температуры на юго-западе Гренландии и п-ве Лабрадор.

В нечетном цикле 1976-1986 гг., наиболее интенсивном за рассмотренный интервал лет, средний Азорский антициклон был в среднем за год более интенсивным, что отразилось в синхронизации изменений температуры на всей территории Пиренейского п-ва и северо-западе Африки (рисунок 1а). Известная в эти годы «Большая аномалия солёности» [10] (отрицательная), центр которой, как раз, к 1975-1978 гг. сместился к Исландии и, далее, в Норвежское море [11], способствовала увеличению градиентов температуры на северном полярном фронте с максимизацией этого процесса в начале данного цикла солнечной активности, что способствовало резкому увеличению числа образующихся циклонов в этой зоне и, соответственно, потоков тепла и влаги на север Европы и в полярный бассейн. Кроме того, в нечетные циклы солнечной активности вынос льда через пролив Фрама увеличивается [12]. Все указанное способствовало синхронизации изменений температуры по четырем кластерам станций: Британских островов, Скандинавии, Шпицбергена, Исландии (рисунок 1а).

Приведенные здесь оценки верифицируют развиваемый метод анализа системных свойств климата и подтверждают его эффективность.

1. Hurrell J.W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation / J.W. Hurrell // *Science*, 1995. – V. 269. – P. 676-679.

2. University of East Anglia. Data Sets. – Norwich. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.uea.ac.uk/web/groups-and-centres/climatic-research-unit/data>. (дата обращения: 09.03.2023).

3. SILSO: World Data Center for the production, preservation and dissemination of the international sunspot number. – Brussels, 2021. – [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sidc.be/silso/home> (дата обращения: 09.03.2023)].

4. Волков Ю.В. Структура температурного поля Северного полушария в период современных климатических изменений / Ю.В. Волков, Н.Н. Чередыко, В.А. Тартаковский // *Оптика атмосферы и океана*, 2022. – Т. 35, № 02. – С. 143-149. – DOI: 10.15372/AOO20220210.

5. Климатическая изменчивость индекса Северо-Атлантического колебания (САК) и связанные с ней флуктуации температуры / В.Н. Еремеев, А.Н. Жуков, М.А. Крашенинникова, А.А. Сизов, А.Е. Чехлан // *Известия РАН. Серия Географическая*, 2014. – № 2. – С. 53-60.

6. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан / Е.С. Нестеров. – М.: Триада, лтд, 2013. 144 с.

7. Mechanisms of winter precipitation variability in the European–Mediterranean region associated with the North Atlantic oscillation. / R. Seager [et al.] // *J Clim*, 2020. – V. 33. – P. 7179-7196. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0011.1>.

8. Изменчивость водных масс в северной Атлантике по данным гидрологических разрезов вдоль 60° с.ш. / С.А. Добролюбо [и др.] // *Доклады РАН*, 2003. – Т. 390, № 2. – С. 255-259.

9. The impacts of the PNA and NAO on annual maximum snowpack over southern Canada during 1979–2009 / H. Zhao [et al.] // *Int. J. Clim.*, 2013. – V. 33, Is. 2. P. 388-395. <https://doi.org/10.1002/joc.3431>.

10. The “great salinity anomaly” in the northern North Atlantic 1968–1982 / R. Dickson [et al.] // *Prog. Oceanogr.*, 1988. – V. 20. – P. 103-151, [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(88\)90049-3](https://doi.org/10.1016/0079-6611(88)90049-3).

11. Kim W.M. Revisiting the Causal Connection between the Great Salinity Anomaly of the 1970s and the Shutdown of Labrador Sea Deep Convection / W.M. Kim, Yeager S., and G. Danabasoglu // *J. Climate*, 2021. – V. 34. – P. 675-696, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0327.1>.

12. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей евразийского шельфа / И.Е. Фролов [и др.]. – СПб.: Наука, 2007. – 135 с.

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАМОРОЗКОВ ДЛЯ АГРОЗОНЫ ЮГА СИБИРИ В ПЕРИОД ПОТЕПЛЕНИЯ

*Чердько Н.Н.<sup>1,2</sup>, Кужевская И.В.<sup>2</sup>, Волкова М.А.<sup>2</sup>, Горбатенко В.П.<sup>2</sup>,  
Нечепуренко О.Е.<sup>2</sup>, Носырева О.В.<sup>2</sup>, Чурсин В.В.<sup>2</sup>*

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет

atnik3@mail.ru, irina-kuz@vtomske.ru, mv2101@mail.ru, vpgor@tpu.ru,  
o.e.nechepurenko@gmail.com, ov\_nosyreva@mail.ru, skriptym@mail.ru

Учет и прогноз последствий изменений климата важен для обеспечения развития аграрного сектора и укрепления продовольственной безопасности страны. Использование с этой целью средних многолетних значений характеристик агроклиматических ресурсов не вполне может удовлетворять запросы потребителей на фоне наблюдающегося с середины XX в. потепления климата и отмечаемых его противоположных последствий в разных регионах [1]. Потенциально, потепление является благоприятным фактором развития сельскохозяйственного сектора Сибирского федерального округа (СФО), занимающего лидирующие позиции в растениеводстве страны, несмотря на то, что относится к зоне рискованного земледелия. Одним из основных факторов, несущих риски, является режим заморозков, и он может нивелировать положительный эффект потепления.

Поздние весенние и ранние осенние заморозки относят к опасным явлениям, наносящим существенный урон сельскому хозяйству, и их режим во многом определяет специфику территории и ее эффективность для сельскохозяйственного использования. Заморозком называют кратковременное понижение температуры воздуха или поверхности почвы (травостоя) до 0 °С и ниже, наблюдаемое в вегетационный период на фоне положительных средних суточных температур воздуха [2]. Особо опасны такие события в период активной вегетации, когда средние суточные температуры выше 10 °С. Интенсивность и повторяемость заморозков в зависимости от региона весьма изменчивы и определяются, помимо атмосферных, также и местными условиями. Значительная протяженность зоны землепользования юга Сибири с запада на восток, неоднородности рельефа, различия почвенного покрова, обуславливают нарушения квазиширотного распределения характеристик заморозков и, в целом, частое и довольно резкое изменение агроклиматических условий.

В данной работе проведена оценка интенсивности и повторяемости заморозков для агрозоны юга Сибири для периода 1961-2020 гг. Рассмотрены территории, наиболее благоприятные для ведения сельского хозяйства. Отдельные регионы внутри исследованного макрорегиона расположены в разных почвенно-климатических зонах, что является одним из факторов размеров площадей сельхозугодий, специализации и степени интенсивности ведения сельскохозяйственного производства. Данный земледельческий субрегион представлен, главным образом, лесостепными и таежными типами агроландшафтов, небольшая часть сельхозугодий расположена в степной зоне. Преобладает равнинный характер рельефа. Для данной территории характерны ежегодные поздние весенние и ранние осенние заморозки, которые существенно сокращают вегетационный сезон.

Для вегетационных сезонов рассмотренного периода лет практически для всей рассмотренной территории характерен статистически значимый рост теплообеспеченности на фоне потепления климата. Суммы температур периодов вегетации (выше 5 °С) и активной вегетации (выше 10 °С) повысились. Этот рост ускорился в два последних десятилетия с наибольшими отклонениями от средних многолетних на юге исследованной территории.

Влагообеспеченность территории на фоне роста ресурсов тепла статистически незначимо. Значимое увеличение сумм осадков (с вероятностью не менее 95%) зарегистрировано только на трех станциях (станции Солянка, Солонешное, Бакчар), расположенных в разных частях исследуемого региона.

Еще одним из важнейших факторов, лимитирующих степень вызревания и формирование урожая сельскохозяйственных культур, является продолжительность вегетационного периода, что характеризуется продолжительностью периодов со средней температурой выше заданных пределов. Для всей рассмотренной территории выявлено увеличение непрерывной длительности периодов с температурой выше 5°C со средней скоростью 3,2 дня/10 лет (рис. 1). В степной агрозоне Алтайского края изменения продолжительности периодов вегетации одной направленности, но разной интенсивности: на северо-западе региона (станция Славгород) они почти в два раза выше, чем в предгорной степной зоне Края (станция Змеиногорск). Также, минимальный рост продолжительности вегетационных сезонов выявлен для лесостепной зоны (станция Бийск-Зональная, Верхнеобская лесостепная физико-географическая провинция). Станции, где отмечен наибольший для агрозоны СФО рост длительности сезонов вегетации, большей частью расположены выше 55° с.ш.

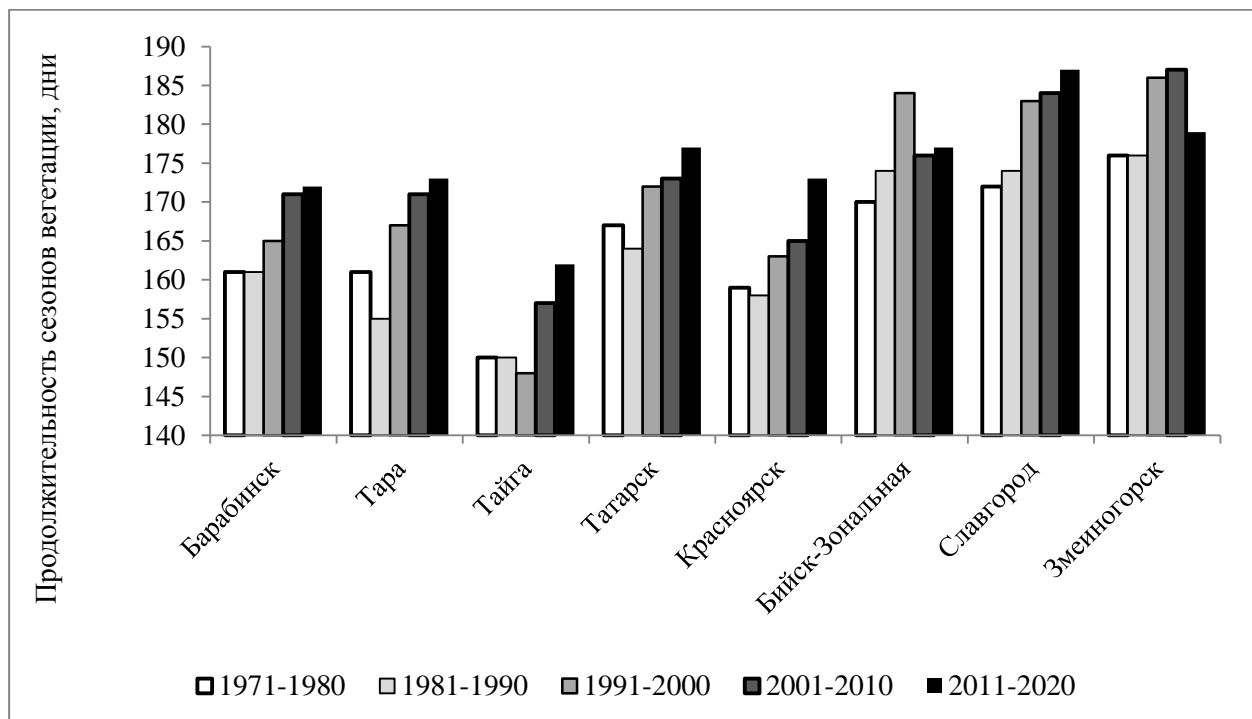


Рисунок 1. Средняя по десятилетиям продолжительность вегетационных сезонов по данным репрезентативных станций агрозоны СФО в период потепления климата.

Для рассмотренных станций проанализированы даты последних заморозков весной (начало лета) и первых заморозков осенью (конец лета). Беззаморозковый период варьирует в широких пределах и в зависимости от сезона, и пространственно. Даты последних весенних заморозков по данным большинства станций в 70% лет соответствовали интервалу изменчивости  $\pm\sigma$ , в 25% сезонов – интервалу  $\pm 2\sigma$ . Для самых ранних осенних заморозков изменчивость существенно выше и варьирует в зависимости от региона.

Для оценки временной изменчивости заморозков, были рассмотрены их характеристики по десятилетиям (таблица 1). На некоторых станциях в последние два десятилетия отмечается смещение весенних заморозков на более ранние сроки. Тем не менее, даты

самых поздних заморозков в любом из десятилетий на большинстве станций фиксируются, по-прежнему, в июне. Для осенних заморозков однозначных тенденций не выявлено, их режим и в среднем за десятилетия и для дат самых ранних заморозков внутри десятилетий характеризуется существенной изменчивостью. Можно предположить, что такая изменчивость связана с тем, что в СФО в весенний период отмечается наиболее сильное потепление, а в осенний сезон тренды в большинстве своем незначительны [3].

**Таблица 1. Средние по десятилетиям даты поздних весенних и ранних осенних заморозков по данным репрезентативных станций агрозоны СФО в период потепления климата.**

	Барабинск	Тара	Тайга	Татарск	Красноярск	Бийск-Зональная	Славгород	Змеиногорск
1971-1980	22.май	23.май	03.июн	23.май	21.май	18.май	17.май	24.май
	20.сен	18.сен	06.сен	19.сен	16.сен	21.сен	22.сен	07.сен
1981-1990	22.май	25.май	03.июн	14.май	22.май	14.май	19.май	24.май
	18.сен	11.сен	05.сен	23.сен	17.сен	19.сен	26.сен	14.сен
1991-2000	23.май	22.май	01.июн	21.май	20.май	18.май	12.май	28.май
	19.сен	15.сен	02.сен	19.сен	17.сен	22.сен	24.сен	11.сен
2001-2010	15.май	27.май	31.май	15.май	12.май	10.май	12.май	22.май
	16.сен	12.сен	08.сен	15.сен	14.сен	21.сен	19.сен	14.сен
2011-2020	16.май	22.май	28.май	17.май	17.май	20.май	14.май	20.май
	25.сен	23.сен	09.сен	21.сен	20.сен	23.сен	30.сен	16.сен

Несмотря на рост теплообеспеченности вегетационных сезонов почти для всех рассмотренных станций, вероятность поздних весенних и ранних осенних заморозков остается в пределах климатической нормы. В последнее десятилетие (2011–2020 гг.) весенние заморозки часто наблюдались до 10 июня, а осенние могли формироваться уже во второй декаде августа.

Таким образом, заморозки остаются основным лимитирующим фактором при выборе культур и сроков агротехнических мероприятий в агрозоне юга Сибири, а потепление пока не сказалось на смягчении условий земледелия. Это подтверждается данными [4], где отмечено, что изменчивость климатически обусловленной урожайности зерновых в СФО были незначительными.

1. МГЭИК, 2019: Резюме для политиков. 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 / под ред. П. Р. Шукла, Д. Ски, Э. Кальво Буэндия [и др.] — Кембридж юниверсити пресс, 36 с.

2. Грингоф И.Г. Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения / И.Г. Грингоф, А.Д. Пасечнюк – СПб.: Гидрометеоиздат, 2005. – 552 с.

3. Глобальные изменения климата и Сибирский Федеральный округ. На пути к адаптации / Климатический центр Росгидромета. – СПб.: Научное издание, 2021. – 12 с.

4. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. — СПб.: Научное издание, 2022. – 676 с.



## **ОПАСНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В РОССИИ: АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ПО РАЗНЫМ ДАННЫМ**

*Чернокульский А.В.*

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва,  
a.chernokulsky@ifaran.ru

Рост приповерхностной температуры и влажности воздуха, а также увеличение вертикального градиента температуры способствуют интенсификации атмосферной конвекции и может приводить к усилению и учащению конвективных опасных явлений погоды (КОЯП). К семейству КОЯП обычно относят крупный град (обычно диаметром более 2 см), шквалы со скоростью более 25 м/с, смерчи (чаще всего первой и выше категории по шкале Фудзиты), сильные ливни, вызывающие в том числе паводковые наводнения на реках. КОЯП в подавляющем большинстве случаев связаны с прохождением мульти-ячейковых и суперъячейковых облаков, так называемых опасных конвективных штормов («severe convective storms»), которые также характеризуются повышенной молниевой активностью. В России с КОЯП связаны существенные негативные последствия, включая разрушение зданий и объектов инфраструктуры, гибель людей, сплошное повреждение лесного покрова. Отмечается рост ущерба от КОЯП, который, с одной стороны, связан с усилением факторов подверженности и уязвимости, но отчасти может быть связан и с учащением событий КОЯП.

В данной работе проведен анализ изменения повторяемости и интенсивности КОЯП в регионах России в теплый период года на основе различных независимых источников информации – данных наземных наблюдений, спутниковой информации и данных реанализа.

Для оценки повторяемости событий КОЯП использовались срочные данные стандартных метеорологических наблюдений с 521 российской станции [4] за 1966–2020 гг. (для ветра – с 1977 г.). Анализировался теплый период года с апреля по сентябрь. На основе этих данных рассматривались как непосредственно события КОЯП (экстремальные ливни, сильный ветер), так и другие переменные, характеризующие повторяемость развития атмосферной конвекции (но не интенсивности): сумма всех ливневых осадков, закрытая кучево-дождевыми облаками доля небосвода в дневное время, град любой интенсивности, наличие гроз. Повторяемость рассчитывалась, как отношение количества таких дней (например, грозовых дней или дней с градом) к общему числу дней с апреля по сентябрь.

На основе спутниковых данных Landsat/Sentinel-2 о ветровалах оценена повторяемость и интенсивность смерчевых и шкваловых событий, вызвавших данные ветровалы (за 1986–2021 гг.). На основе спутниковых данных MODIS оценена высота верхней границы облаков глубокой конвекции (за 2002–2021 гг.), которая является косвенным индикатором интенсивности конвекции. На основе данных реанализа ERA5 оценена повторяемость условий, характерных для развития умеренных и интенсивных КОЯП за период с 1959 по 2022 гг.

Для оценки повторяемости сильных шквалов и смерчей (первой и выше категории по шкале Фудзиты) привлекалась информация о ветровалах в лесной зоне европейской территории России [65] за 1986–2021 гг., основанная на идентификации ветровалов по спутниковым данным Landsat и их последующей проверке с помощью снимков высокого разрешения.

В качестве независимой оценки общей интенсивности конвективных процессов также привлекались спутниковые данные о высоте облаков глубокой конвекции, рассчи-

танной по данным MODIS для различных характеристик облаков. Высота облаков глубокой конвекции рассчитывалась за месяц для региона Северной Евразии (45–70° с.ш., 30–150° в.д.), как средняя высота всех соответствующих пикселей в этом регионе в данный месяц. Было проанализировано изменение высоты за период 2002–2021 гг. Из-за существенного объема исходных данных анализ был ограничен июлем и наблюдениями со спутника Тегга.

Для оценки условий, характерных для образования КОЯП, использовался т.н. «ингредиентный подход». В рамках этого подхода были проанализированы значения индексов конвективной неустойчивости (и их критических значений), формализующих специфические условия атмосферы, характерные для формирования КОЯП. Основой расчета индексов были данные современного реанализа ERA5 с высоким пространственным (около 30 км) вертикальным (20 уровней от поверхности до высоты 300 гПа) и временным разрешением (1 час). Для региона Северной Евразии для периода 1959–2020 гг. рассчитано более 50 различных индексов конвективной неустойчивости — термодинамических, динамических, композитных. В данной работе был проведен анализ изменений величины лишь некоторых из них. Были рассчитаны изменения средних значений индексов (за период с апреля по сентябрь) и повторяемости ряда критических значений.

Межгодовая изменчивость рассмотренных переменных аппроксимировалась линейным трендом, рассчитанным на основе непараметрической медианной оценочной функции Тейла–Сена, менее чувствительной к выбросам, чем стандартный метод наименьших квадратов. Уровень значимости тренда оценивался на основе ранговой корреляции Манна–Кендалла. Более подробная информация об используемых данных и подходах представлена в работе [1].

Согласно анализу данных наблюдений на метеорологических станциях, для характеристик ливневых осадков — суммы осадков во время всех ливневых дождей, суммы осадков во время экстремальных ливней (95го перцентиля), вклада этих ливней в общую сумму осадков — отмечаются согласованные и значимые положительные изменения. Статистически значимый рост рассмотренных характеристик ливневых осадков, отмечается на большинстве станций, особенно сильный на юге Сибири и юге Дальнего Востока (до 8% за десятилетие на отдельных станциях). Наименьшие изменения (как по величине, так и по количеству станций со статистически значимым трендом одного знака) отмечены на юге европейской территории России и юге Урала. Наряду с ростом ливневых осадков на территории России отмечается рост доли небосвода, занятой кучево-дождевыми облаками и числа грозовых дней, более выраженный на юге Сибири и Дальнего Востока. На фоне общего роста дней с грозой нами выявлен ряд регионов с разнонаправленными тенденциями, в частности, значимые тренды по сокращению числа дней с грозой демонстрирует ряд станций на европейской территории России и Дальнем Востоке.

На основе анализа спутниковых данных MODIS для региона Северной Евразии выявлен статистически значимый рост верхней границы облаков глубокой конвекции, скорость которого составляет около 280 м десятилетие<sup>-1</sup> в дневное время и 330 м десятилетие<sup>-1</sup> в ночное время. Рост высоты конвективных облаков говорит об общей интенсификации грозовой активности в регионах Северной Евразии.

Существующие источники данных не дают возможности сделать какие-либо однозначные выводы об изменении градовой активности на территории России: подавляющее большинство станций демонстрируют незначимые тренды повторяемости града. Учитывая редкость и характерный масштаб сильных шквалов (>25 м/с) и смерчей, оценка их долгопериодной изменчивости по данным станционных наблюдений также затруднительна. По данным наблюдений за максимальной скоростью ветра на метеорологических станциях отмечаются достаточно слабые изменения повторяемости дней со

скоростью ветра  $\geq 20$  м/с, преимущественно отрицательные, при этом значимые изменения отмечены на востоке европейской территории России, юге Сибири и на побережье морей Тихого океана. Наибольшую согласованность показывают станции на юге Сибири, где большинство станций демонстрируют отрицательный значимый тренд ветровых событий в теплое время года (до  $-2$  % десятилетие<sup>-1</sup>). При этом, для событий со штормовым ветром ( $\geq 25$  м/с) тренды по станциям не значимы.

Мерой интенсивности шкваловых и смерчевых событий в лесной зоне может служить площадь сплошных ветровалов. Для лесной зоны европейской территории России с конца 1980-х гг. отмечается как значимый рост числа конвективных штормов, вызвавших смерчевые и шкваловые ветровалы (величина тренда составляет 2,5 события в десятилетие), так и суммарной площади этих ветровалов (9,3 км<sup>2</sup> десятилетие<sup>-1</sup>). Отмечается существенная межгодовая изменчивость площади ветровалов, в частности, выделяются 2010 и 2021 гг., когда на западной периферии блокирующих антициклонов формировались так называемые события «деречо» — долгоживущие шквалы со временем жизни до 8 часов, которые стали причиной ветровалов длиной более 500 км и средней шириной около 20 км. Подобные события зарегистрированы на территории России впервые.

С учетом ограничения существующих данных наземных наблюдений о КОЯП, целесообразно оценивать повторяемость не самих событий, а условий атмосферы, характерных для их формирования. Такой анализ может быть осуществлен с использованием индексов конвективной неустойчивости, оцененных на основе данных радиозондирования, систем реанализа, расчетов с глобальными и региональными климатическими моделями. Анализируются как изменения средних значений индексов, так и различных квантилей распределения, повторяемости превышения определенных пороговых значений. Например, пороговыми значениями могут служить 150 Дж кг<sup>-1</sup> для CAPE и 400 м<sup>2</sup> с<sup>-2</sup> для WMAXSHEAR, при превышении которых отмечается развитие, соответственно, умеренных или сильных КОЯП.

Значения повторяемости данных критических значений индексов конвективной неустойчивости, рассчитанных по данным реанализа последнего поколения ERA5 за 1959–2020 гг., меняются разнонаправленно в различных регионах России. В частности, отмечается ослабление конвективной активности на юге европейской территории России и Урала, где выявлено сокращение повторяемости критических значений индексов. На юге Дальнего Востока проявляются разнонаправленные и по большей части незначимые изменения индексов конвективной неустойчивости. На побережье Черного моря и на юге Сибири отмечены положительные тренды повторяемости критических значений индексов CAPE и WMAXSHEAR, которые указывают на рост вероятности развития КОЯП, в том числе интенсивных, в данных регионах.

В целом, результаты проведенного анализа указывают на общую интенсификацию КОЯП в большинстве регионов России за исключением ряда регионов на юге европейской территории России. Повторяемость умеренных КОЯП имеет тенденцию к уменьшению, а наиболее сильных — к росту. Полученные результаты целесообразно принимать во внимание при разработке планов адаптации российских регионов и отраслей к изменению климата, в том числе при оценке рисков для коммерческих компаний.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования (соглашение № 075-15-2021-577).

1. Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов И.И., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И. Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // Метеорология и гидрология, 2022, №5, С.27–41.

## Секция 2

# Экосистемы различных природных зон, природно-климатические изменения и процессы

### ФОТОАССИМИЛЯЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ СОСНОВЫХ МОЛОДНЯКОВ РАЗЛИЧНОЙ ГУСТОТЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

Арясов В.Е.<sup>1</sup>, Шемберг А.М.<sup>1</sup>, Полосухина Д.А.<sup>1,2</sup>, Панов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск, vova\_aryasov@mail.ru

<sup>2</sup>Институт экологии и географии, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Изучение параметров фотосинтеза древесных растений и их взаимосвязей с динамикой климата и факторов окружающей среды является необходимым условием для понимания особенностей круговорота углерода в лесных экосистемах - ключевом звене его биосферной регуляции (Blankenship, 2021; Ruban, 2012). Освещенность для древесных растений выступает одним из ключевых экологических факторов, определяющих структурно-функциональную активность ассимиляционного аппарата (Ruban, 2015). Изучение состояния древостоя, а также эффектов лесохозяйственных мероприятий, направленных на сохранение и увеличение экологического и ресурсного потенциала насаждений, является важной задачей лесной науки в условиях изменяющегося климата и антропогенного пресса (Тараканов и др, 2017). Густота древостоев влияет на потенциал роста и развития древесных ценозов, однако густотные градиенты в публикациях по лесной экологии почти не рассматриваются. Хотя структура насаждений определяет размер ресурса, включая пространство, используемое каждой особью в процессе своего роста и развития (Кузьмичев и др, 2014).

Целью исследования является определение особенностей флуоресценции хлорофилла и фотосинтетических пигментов в зависимости от густоты древостоя сосновых молодняков Центральной Сибири.

Объектами исследования служили чистые сосновые молодняки (*Pinus sylvestris* L.) разной густоты на территории Борского лесничества, в районе обсерватории ZOTTO (60° с.ш., 89° в.д.) (URL: <https://www.zottoproject.org/>). Изучено три варианта насаждений 17-ти летнего возраста. Первый вариант представлен древостоем произрастающем вблизи стен окружающего леса, в наиболее благоприятных лесорастительных условиях с высокой начальной густотой 19.8 тыс. шт./га. Второй вариант, продуцирующий в менее благоприятных условиях на расстоянии менее 100 м. от стен окружающего леса представлен насаждением с густотой – 15.9 тыс. шт./га. В данном ценозе осенью 2022 года были проведены рубки ухода со снижением густоты до 3 тыс. шт./га. На удалении более 200 м. от стен леса сформировался древостой с наименьшей густотой – 8.1 тыс. шт./га.

В июне 2023 года для оценки эффективности функционирования фотосинтетического аппарата древостоев на каждой пробной площади, исходя из принципов равномерно-ступенчатой представленности, было отобрано по 3 дерева, по одному из низшей, средней и максимальной ступеней толщины. У каждого из отобранных деревьев из мутовки второго года жизни, сформировавшейся в 2022 году путем срезания, отбиралось по 3 модельных ветви ориентированных в южную сторону.

Оценка флуоресценции проводилась с использованием прибора Walz junior PAM (Heinz Walz GmbH) ветви подвергались темновой адаптации в течении 30 минут посредством помещения в светонепроницаемый контейнер. Для измерений отбиралась хвоя без видимых повреждений из средней части прироста 2022 года, измерения проводили по стандартной программе Light Curve (URL: [https://www.walz.com/products/chl\\_p700/junior-pam/downloads.html](https://www.walz.com/products/chl_p700/junior-pam/downloads.html)). Более детально

методика изложена в руководстве по работе с флуориметром PAM (Pfündel, 2007). Эффективность работы фотосинтетического аппарата оценивалась посредством значений скорости переноса электронов (electronic transport rate – ETR) с учетом фотосинтетически активной радиации (photosynthetic active radiation PAR) в диапазоне от 0 до 1500 мкмоль фотонов /( $m^2 \cdot c$ ) (рисунок) и рассчитывалась согласно формуле:

$$ETR=PAR*ETR\text{-Factor}*PPS2/PPPS*Y(II) \quad (1)$$

где PAR – Фотосинтетически активная радиация, мкмоль фотонов /( $m^2 \cdot c$ );

ETR-Factor – Поглощение фотонов фотосинтетическими пигментами (0.84);

PPS2/PPPS – Фотоны, поглощенные фотосистемой II (ФС II), относительно фотонов, поглощенных фотосинтетическими пигментами (0.5);

Y(II) – Фотохимический квантовый выход ФС II.

Для оценки жизненного состояния хвои использовалось отношение  $F_v/F_m$  – максимальный фотохимический квантовый выход ФС II (таблица 1), соответствует доле поглощенной энергии, преобразованную в фотохимическую энергию в условиях акклимации к темноте (Kitajima and Butler, 1975).

Количественная оценка содержания фотосинтетических пигментов проводилась согласно методике Барнеса (Barnes et al., 1992). Экстракция производилась с использованием навески (190-195 мг сырого веса) не менее 10 интактных хвоинок. В пробирку объемом 20 мл с навеской растительного материала добавляли 7 мл диметилсульфоксида (ДМСО). Пробирки помещали в водяную баню 5 drops-2S (UED Group, Россия) и инкубировали в течение 2 часов при 60 °С. Полученные экстракты помещали во флаконы темного стекла и хранили в холодильнике при 4°С до проведения анализа (Wellburn, 1994, Lichtenthaler et al., 2007). Концентрация пигментов в экстрактах получена на основе анализа спектров поглощения спектрофотометра Varian Cary 100 (Agilent Corp., США).

Содержание хлорофиллов и суммы каротиноидов (таблица 2) рассчитывали по уравнениям согласно (Wellburn, 1994):

$$Ca=12.47*A665-3.62*A649 \quad (2)$$

$$Cb=25.06*A649-6.5*A665 \quad (3)$$

$$Cx+c=(1000*A480-1.29Ca-53.78Cb)/220 \quad (4)$$

где: Ca, Cb и Cx+c – массовые концентрации хлорофилла a, хлорофилла b и каротиноидов в растворе с ДМСО, соответственно, мг/л;

A480, A649, A665 – оптические плотности раствора при длинах волн 480, 665 и 649 нм, соответственно.

Для определения содержания пигментов в хвое (мг/г) использовалась формула:

$$F=(VCn)/P \quad (5)$$

где: V – объем вытяжки, л;

Cn – концентрация пигмента, мг/л;

P – навеска, г.

Оценка нормализованного относительного вегетационного индекса (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) проводилась с использованием мини-спектрометра CI-710S (CID Bio-Science). NDVI рассчитывался по формуле:

$$NDVI=(R800-R680)/(R800+R680) \quad (6)$$

где: R800 – коэффициент отражения при 800нм;

R680 – коэффициент отражения при 680нм.

В красной области спектра (0.6–0.7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0.7–1.0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть, высокая фотосинтетическая активность ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной (Рахматуллина и др., 2019).

Расчет интегральной для древостоев проводился посредством использования характера распределения деревьев по ступеням толщины в каждом из насаждений.

Согласно полученным данным скорость переноса электронов в изученных вариантах сосновых ценозов имеет примерно равные значения при слабой интенсивности освещения ( $PAR < 400$  мкмоль фотонов /( $m^2 \cdot c$ )). При увеличении интенсивности фотосинтетически активной радиации вариант древостоя с повышенными конкурентными отношениями имеет наименьшие

значения ETR. Рубки ухода повысили эффективность утилизации световой энергии при низких и средних значениях PAR, однако она не достигает значений варианта молодняков с изначально низкой плотностью (ППЗ).

Флуориметрический метод не отражает процессы роста и продуктивности древостоев как целостных систем. Продуктивность древостоев будет зависеть не только от интенсивности фотосинтеза, но и от количества фотосинтетически активных фракций фитомассы и содержания пигментов (Дымова, 2019).

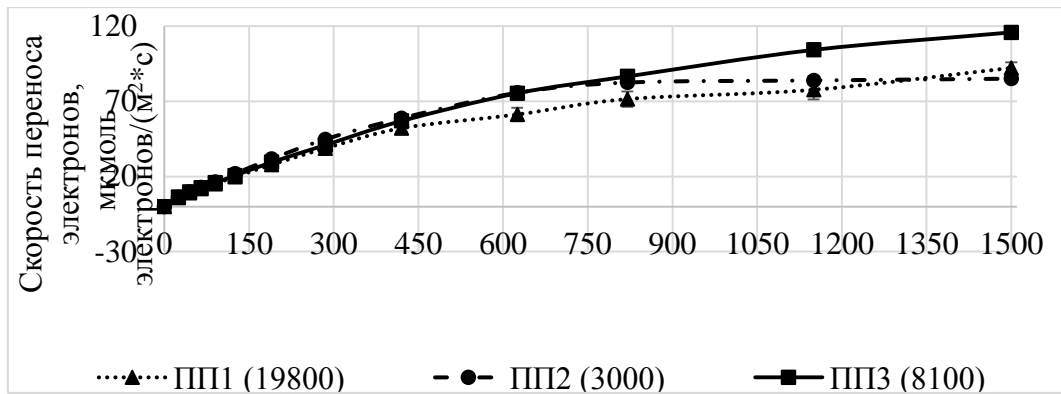


Рисунок 1. Скорость переноса электронов (ETR) в зависимости от фотосинтетически активной радиации (PAR) для 3 вариантов сосновых молодняков. Фотосинтетически активная радиация (PAR), мкмоль фотонов/(м²\*с).

В этой связи, во время закладки пробных площадок было отобрано по 3 модельных дерева из низшей, средней и максимальной ступеней толщины с каждой пробной площади, что позволило оценить массу фотоассимиляционного аппарата для каждого варианта древостоя. Отмечено, что наибольшая масса хвои была в перегущенном варианте сосняка. Интенсивные рубки ухода снизили запас двухлетней хвои с 1 т/га до 0.5 т/га, а общий запас с 3.9 до 1.7 т/га. Древостой с низкими конкурентными отношениями сформировал запас фотосинтетического аппарата, уступающий перегущенной структуре всего на 16% для хвои, сформировавшейся в 2022 году и на 6% для общей массы (таблица 1). Сосняки, произрастающие в условиях высоких конкурентных отношений, имеют наименьшие значения индекса NDVI и отношения Fv/Fm, что свидетельствует о меньшей продуктивности фотосинтетического аппарата среди изученных древостоев.

Наибольшая концентрация хлорофилла в условиях низкой освещенности рассматривается как адаптивная реакция (Дымова, 2019), направленная на улучшение светособирающих свойств фотосинтетического аппарата, и соответствует деревьям, отстающим в росте. В связи с тем, что в перегущенном варианте сосняка наибольшее количество угнетенных деревьев, то и масса пигментов для данной структуры насаждения имеет наибольшие значения (таблица 2). При этом древостои, подвергшиеся рубкам ухода, быстро адаптировались к изменившимся условиям освещенности, в таких древостоях концентрация пигментов на уровне сосняков, сформировавшихся в условиях низкой конкуренции (ППЗ), а за счет изреженной структуры для них характерны наименьший запас хлорофилла и каротиноидов на гектар.

**Таблица 1. Масса и индексы состояния фотоассимиляционного аппарата.**

№	Масса хвои второго года жизни т/га	Общая масса хвои т/га	Fv/Fm	NDVI
ПП1	0.98	3.5	0.765	0.784
ПП2	0.48	1.7	0.798	0.826
ПП3	0.82	3.3	0.785	0.843

**Таблица 2. Содержание пигментов в хвое второго года сосновых молодняков.**

№	Густота тыс. шт/га	Запас пигментов			Ca:Cb	Концентрация пигментов		
		Ca, кг/га	Cb, кг/га	Cx+c, кг/га		Ca г/кг хвой	Cb г/кг хвой	Cx+c г/кг хвой
ПП1	19.8	0.73	0.29	0.15	2.514	0.74	0.29	0.16
ПП2	3	0.22	0.08	0.05	2.619	0.45	0.17	0.11
ПП3	8.1	0.4	0.14	0.06	2.838	0.49	0.17	0.07

Таким образом густота древостоя влияет на запас пигментов, наибольшая масса которых наблюдается в перегушенных древостоях, с большим количеством деревьев, отстающих в росте, однако в таких древостоях зафиксирована меньшая продуктивность фотосинтетического аппарата и наименьшая эффективность утилизации световой энергии. Рубки ухода положительно влияют на продуктивность и эффективность фотоассимиляционного аппарата, но при этом уменьшается концентрация пигментов в хвое и их запас на га.

1. Blankenship R. E. Molecular mechanisms of photosynthesis. – John Wiley & Sons, 2021.
2. Ruban A. V. The photosynthetic membrane: molecular mechanisms and biophysics of light harvesting. – John Wiley & Sons, 2012.
3. Ruban A. V. Evolution under the sun: optimizing light harvesting in photosynthesis //Journal of experimental botany. – 2015. – Т. 66. – №. 1. – С. 7-23.
4. Тараканов А. М., Сурина Е. А., Сеньков А. О. Лесохозяйственные мероприятия по адаптации растительности к изменению климата //Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2017. – №. 47. – С. 67-71.
5. Кузьмичев В. В., Пшеничникова Л. С. Влияние плотности популяций сосны на изменчивость размеров деревьев //Сибирский лесной журнал. – 2014. – №. 3. – С. 150-156.
6. Zotino Tall Tower Observatory: [сайт]. URL: <https://www.zottoproject.org/> (дата обращения: 14.08.2023).
7. Walz: [сайт]. URL: [https://www.walz.com/products/chl\\_p700/junior-pam/downloads.html](https://www.walz.com/products/chl_p700/junior-pam/downloads.html) (дата обращения: 31.08.2023).
8. Pfündel E. JUNIOR-PAM chlorophyll fluorometer operators guide //H Walz GmbH: Effeltrich, Germany. – 2007.
9. Kitajima M., Butler W. L. Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone //Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics. – 1975. – Т. 376. – №. 1. – С. 105-115.
10. Barnes J. D. et al. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls a and b in lichens and higher plants //Environmental and Experimental botany. – 1992. – Т. 32. – №. 2. – С. 85-100.
11. Wellburn A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution //Journal of plant physiology. – 1994. – Т. 144. – №. 3. – С. 307-313.
12. Lichtenthaler H. K. et al. Differences in pigment composition, photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence images of sun and shade leaves of four tree species //Plant Physiology and Biochemistry. – 2007. – Т. 45. – №. 8. – С. 577-588.
13. Динамика вегетационного индекса NDVI насаждений сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях загрязнения Уфимского промышленного центра / И. Р. Рахматуллина, З. З. Рахматуллин, Ф. Ф. Исхаков, О. В. Серова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2019. – № 2(34). – С. 106-117. – DOI 10.15593/2409-5125/2019.02.09. – EDN ZYIHQL.
14. Дымова О.В. Пигментный комплекс растений в условиях таёжной зоны европейского северо-востока (организация и функционирование): дис. д-р. био. наук: 03.01.05. - Сыктывкар, 2019. - 219 с.



## ДЕНДРОИНДИКАЦИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В БАРГУЗИНСКОМ ЗАПОВЕДНИКЕ

Балыбина А.С.<sup>1</sup>, Мядзелец А.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, balybina@irigs.irk.ru

<sup>2</sup>ФГБУ Заповедное Подлесье, п. Усть-Баргузин, anastasia@irigs.irk.ru

Изучение климата только на основе анализа метеорологических и гидрологических инструментальных наблюдений невозможно из-за ограниченности таких рядов во времени и пространстве. Одним из доступных неинструментальных методов фиксации климатических колебаний являются дендрологические индикаторы. Дендрохронологические данные могут использоваться для выявления закономерностей многолетней изменчивости метеорологических условий в различных местоположениях. Особую актуальность такие исследования имеют для труднодоступных территорий со сложной транспортной логистикой.

В данной работе сделан предварительный анализ и оценка колебаний климатических показателей (температуры воздуха и атмосферных осадков) на территории Баргузинского заповедника (объединенная дирекция ФГБУ Заповедное Подлесье), за предыдущие столетия на основе дендрохронологических данных. Исследуемые участки находятся на северо-западном макросклоне Баргузинского хребта. Климат территории исследования резко континентальный, с чертами морского. Близость Байкала смягчает температурный режим. Наиболее холодный месяц – январь (среднемесячная температура  $-23^{\circ}\text{C}$ ), самый теплый – август (среднемесячная температура  $+13^{\circ}\text{C}$ ). Зима продолжается в среднем 161 день, лето – 81 день. Глубина снежного покрова составляет 60-90 см, а в гольцах – 180-250 см [1].

В 2019-2022 годах в рамках совместных работ ИГ СО РАН и ФГБУ Заповедное Подлесье были собраны керны хвойных деревьев (сосны сибирской (*Pinus sibirica*), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*)) в различных местоположениях (рис. 1.). Всего собрано 30 образцов с 5 участков.

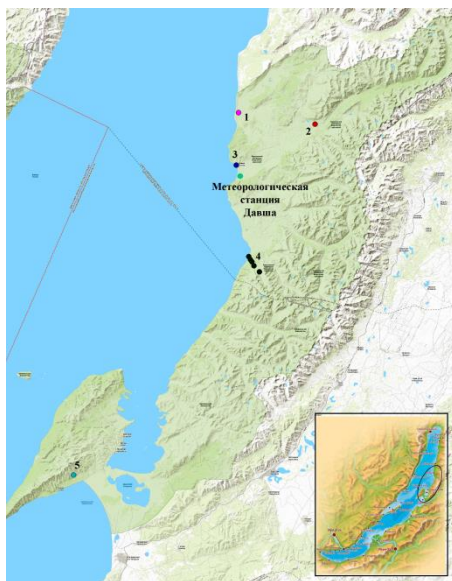


Рисунок 1. Территория исследования. Условные обозначения: точки 1-5 места отбора проб. 1 – устье р. Большая (пробы 2022 г.), 2 – среднее течение р. Большой (гарь 2015 г.) (пробы 2022 г.), 3 – район п. Давша (гарь 2015 г.) (пробы 2022 г.), 4 – бассейн р. Шумилиха (пробы 2019 г.), 5 – полуостров Святой Нос (пробы 2022 г.).

Отбор и обработка буровых кернов проводились стандартными методами дендрохронологии [2]. По отобранным образцам после измерения ширины годовых колец (ШГК) были построены индивидуальные древесно-кольцевые хронологии (ДКХ). Затем, для исключения возрастного тренда, было произведено индексирование рядов ШГК каждого образца.

Оценка степени влияния климатических факторов на древесный прирост, осуществлялась с помощью функции отклика. Оценивание функции отклика ДКХ на климат было сделано при использовании временных рядов температуры воздуха и атмосферных осадков на метеорологической станции Давша, единственной расположенной в максимально возможной близости к местам отбора кернов.

На рисунке 2 показана динамика основных климатических показателей (средняя месячная температура января и июля (Т январь, Т июль), средняя годовая температура воздуха (Ср. год Т) и сумма атмосферных осадков за год (Атм. Осадки год)) на метеостанции Давша за период с 1955 по 2021 год. Как можно видеть, положительный тренд наблюдается у средней месячной температуры июля, средней годовой температуры воздуха и сумм атмосферных осадков. Средняя месячная температура января практически не имеет линейного тренда на увеличение, хотя ее межгодовые колебания более значительны, чем у температуры июля. Амплитуда межгодовых колебаний в январе достигает 20 градусов, в то время как в июле не превышает 6.

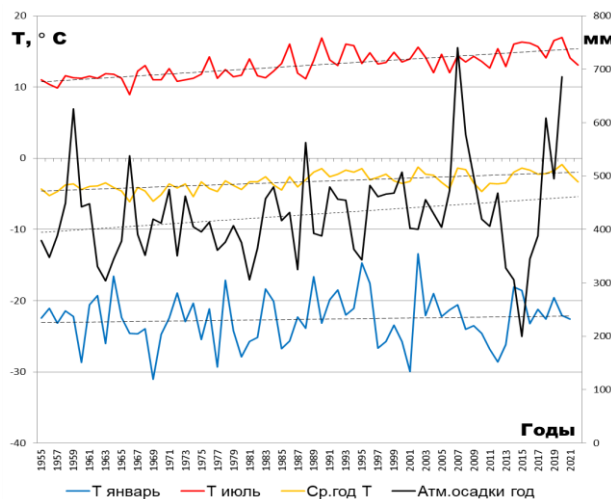


Рисунок 2. Динамика климатических характеристик на метеостанции Давша.

Для того, чтобы индцировать климатические условия в прошлом, требуется найти отклик на климатическую составляющую в настоящем. Это делается с помощью функций отклика (коэффициентов корреляции). Статистический анализ основан на оценке и интерпретации функций отклика [3]. Количественная реконструкция выводится из решения регрессионного уравнения, в котором климатические данные являются зависимой переменной, а индексы прироста – независимой. Адекватность статистической модели оценивается по следующим критериям значимости показателей: коэффициенту корреляции (при критическом значении  $\ll 0,05$ ), коэффициенту детерминации (квадрат корреляции), критерию Фишера с уровнем вероятности  $\ll 95\%$  (для анализа дисперсии).

На рисунке 3 показаны некоторые значения рассчитанных коэффициентов корреляции. Как видно из рисунка, максимальный отклик (0,52-0,55) имеют среднемесячные температуры мая-июля (Т2(3)), а также суммы атмосферных осадков за год 0,43 (Т4(1)). Кроме этого, некоторые деревья имеют отрицательный отклик на климатические параметры, в том числе и достаточно высокий (Т2(4)). Возможно, это объясняется тем, что

метеостанция Давша (данные по которой были использованы в качестве фоновых метеорологических значений) не в полной мере отражает условия произрастания данных модельных деревьев.

На основе полученных результатов выполнена реконструкция суммы атмосферных осадков за год (рис. 4).

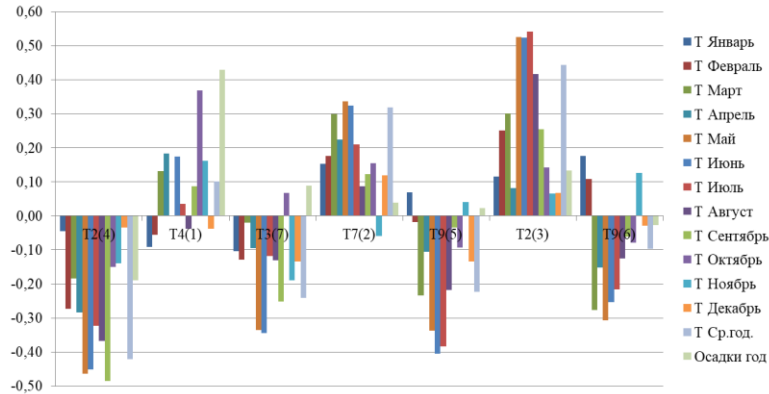


Рисунок 3. Отклик прироста сосны на температуру воздуха и суммы годовых атмосферных осадков.

В качестве модельного выбрано дерево T4(1), которое имеет большой возраст (1800-2019 гг.) и значимый отклик на динамику годовых сумм атмосферных осадков.

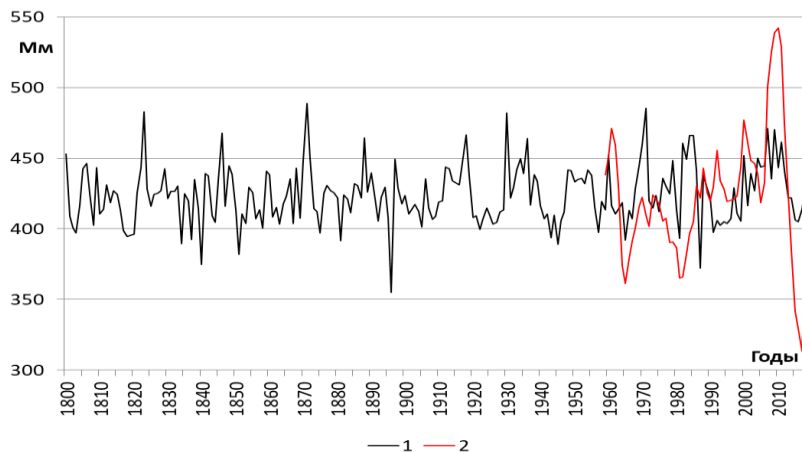


Рисунок 4. Реконструкция сумм атмосферных осадков за год в 19-20 веках. 1 – реконструированные по ШГК суммы атмосферных осадков. 2 – Фактические (сглаженные по 5-летиям) суммы атмосферных осадков на метеостанции Давша.

Анализ хода реконструированных сумм атмосферных осадков показывает, что оба ряда имеют сходную динамику частотных изменений. Погодичные колебания осадков довольно значительны, но длительные (5-летние) скользящие довольно хорошо описываются реконструированным рядом. К сожалению, подобная реконструкция не выявляет экстремальные значения параметра. Следующим этапом работы будет применение более точных методов, в частности, нейронных сетей, которые на примере других исследований показывали хорошую оправданность в применении к дендроклиматическим реконструкциям [4].

Работа выполнена в рамках проектов НИР АААА-А21-121012190059-5; АААА-А21-121012190056-4.

1. Ананина Т.Л., Ананин А.А. Некоторые результаты мониторинга температурного режима, полученные с помощью автоматических метеоприборов (Баргузинский хребет) // Природные комплексы северо-восточного Забайкалья. – Издательство БНЦ СО РАН. – 2019. – С. 183-189.
2. Ваганов Е.А., Шиятов С.Г., Мазепа В.С. Дендроклиматические исследования в Урало-Сибирской Арктике /отв. ред. А.С. Исаев. – Новосибирск: Наука. – 1996. – 246 с.
3. Fritts H.C. Tree-ring and climate. – London; New-York; San Francisco: Acad. Press. 1976. – 567 p.
4. Балыбина А.С. Реконструкция температуры воздуха по дендрохронологическим данным в Приольхонье с помощью метода нейронных сетей // География и природные ресурсы. – 2010. – № 1. – С. 59-63.

## МИКРОКЛИМАТ ЛАНДШАФТОВ ПРИМОРСКОГО ХРЕБТА

*Василенко О.В.<sup>1</sup>, Воронай Н.Н.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
oksa\_na85@mail.ru, voronay\_nn@mail.ru

В широком смысле климат территории формируется в результате взаимодействия теплового баланса подстилающей поверхности и циркуляции атмосферы. В условиях горно-котловинного рельефа, наряду с общими климатообразующими факторами, микроклиматический режим во многом будет обусловлен влиянием локальных, физико-географических особенностей территории. Таким образом, решение научно-исследовательских задач, связанных с описанием климатических характеристик территории с неоднородной ландшафтной структурой, предполагает наличие более детальной информации о климатическом режиме исследуемого района. Юг Восточной Сибири, озеро Байкал с его бассейном и горным обрамлением являются примером подобной территории. Значительные площади с водоразделами, горными массивами и хребтами, затруднениями, связанными с труднодоступностью отдельных районов, лишают территорию достаточной метеорологической изученности. Несмотря на значительное число метеорологических станций на юге Сибири, остается уместным делать выводы о недостатке метеорологических данных для решения научно-исследовательских задач на локальном уровне. В результате работы с описанием микроклиматических характеристик данного района остаются актуальными и в настоящее время.

Приморский хребет расположен вдоль западного побережья озера Байкал, примыкая на севере к Байкальскому хребту, образует западный борт Байкальской котловины. Минимальными высотами характеризуется юго-западная оконечность хребта (у истока реки Ангара около 200 м), при постепенном увеличении к северо-востоку, высота горного обрамления достигает максимальных отметок. Наиболее высокие части хребта – гольцы Сарминский (1658 м), Харигитуй (1657 м), Моряны (1336 м). Максимальные высоты отмечены в районе Трехглавого гольца – 1724 м. Также, Приморский хребет, служащий орографическим барьером на пути движения воздушных масс с запада, является одним из факторов, влияющих на специфику и неоднородность ландшафтно-климатических условий Прибайкалья. На уровне мезоклиматических условий юго-восточный склон Приморского хребта попадает в зону слабого влияния озера Байкал в пределах абсолютных отметок 800–1000 м и характеризуется пониженной теплообеспеченностью вследствие влияния высоты и повышенным атмосферным увлажнением. Термический режим в значительной степени формируется под влиянием абсолютной высоты местности и расстояния от берега Байкала. Влияние водной массы на температуру воздуха по вертикали в пограничном слое атмосферы распространяется до 0,5 км от уровня озера в период с апреля по июль, когда температура воды ниже температуры окружающей суши, а в период с октября по декабрь – обогревающее воздействие до высоты 1–2 км над уровнем озера [1]. По данным [2] климат территории отличается малоснежной зимой, антициклональным зимним режимом с недостаточным атмосферным увлажнением (среднее многолетнее годовое количество осадков 200–400 мм), коротким вегетационным периодом (4–4,5 месяца). Суммарный приход солнечной радиации довольно высокий и составляет 4400–4600 МДж/м<sup>2</sup>. Сумма активных температур (более 10 °С) уменьшается при удалении от берега Байкала с 1400–1600 до 1000–1200 °С в гольцовом поясе.

Для описания микроклиматических характеристик использованы данные круглогодичного автоматического мониторинга метеорологических параметров на юго-восточ-

ном макросклоне Приморского хребта. Наблюдения проводятся на профиле протяженностью около 10 км от берегов Хужир-Нугайского залива (пролив Малое море, озеро Байкал, высота 471 м) вдоль Ланинского ручья до Сарминского гольца (высота 1652 м). Перепад высот составляет 1181 м. Для микроклиматического мониторинга используются логгеры, установленные на высоте 2 м от подстилающей поверхности. В автоматическом режиме каждый час логгер фиксирует температуру и влажность воздуха, таким образом накапливая данные в собственной памяти [3]. В работе использованы данные характеристик температуры и влажности воздуха, полученные с 9 площадок наблюдения (табл.1). В работе представлен анализ наблюдений в период 2013 по 2020 годы.

**Таблица 1. Характеристика площадок наблюдения**

№	Высота над ур.моря, м	Ландшафтное описание*
S1	1656	Плосковершинных и пологохолмистых водоразделов криогенно-структурного типа горно-тундровые с кедровым стлаником на элювии коренных пород с фрагментами торфяно-литоземов перегнойно-торфяных потечно-гумусовых
S2	1418	Склонов с деллями березово-кедровые с густым подлеском из березы кустарниковой и душекии бруснично-черничные леса на дерново-подзолах в сочетании с зарослями душекии и кедрового стланика на курумах
S3	1101	Склонов мелколиственные преимущественно березовые с подростом кедров и густым подлеском кустарничково-зеленомошные на мозаиках дерново-подзолов с литоземами грубогумусовыми
S4	1117	Разновозрастные березовые с подростом кедров голубично-багульниково-брусничные леса (пирогенные сукцессии)
S5	1032	Склонов долин смешанные сосново-кедрово-лиственничные с березой и густым подлеском из багульника болотного и голубики бруснично-мохово-лишайниковые на литоземах грубогумусовых оподзоленных
S6	903	Крутых склонов южной и юго-восточной экспозиции лиственнично-сосновые и сосново-лиственничные кустарниковые разнотравно-бобовые леса на литоземах перегнойно-грубогумусовых
S7	658	Долин ивовые кустарничково-разнотравные
S8	603	Пологих склонов–и предгорных шлейфов остепненные редкостойные лиственничные разнотравно-осочково-злаковые преимущественно на криоаридных и светлогумусовых щебнистых почвах.
S9	460	Склонов ковыльно-житняковые с разнотравьем каменистые степи с останцами преимущественно на литоземах криогумусовых.

\*Использованы данные Вантеевой Ю.В. – н.с. лаборатории теоретической географии ИГ СО РАН [4].

По режиму относительной влажности воздуха можно выделить две группы площадок: более сухие, находящиеся в предгорье (S6–807 м, S7–670 м, S8–603 м, S9–460 м), средние месячные значения здесь не превышают 70%, и более влажные площадки (S1–1656 м, S2–1418 м, S3–1101 м, S4–1117 м, S5–908 м), где средние месячные значения в течение всего года, за исключением апреля-мая, находятся в диапазоне 70-95%. При этом

наиболее влажными по всему профилю являются декабрь-январь, наиболее сухим апрель. Колебания суточных и средних месячных величин происходят синхронно на всех площадках, однако они могут отличаться в отдельные месяцы на 25–30%. Минимальные значения (50–65%) на всех площадках наблюдаются в весеннее время, максимальные – в основном в декабре-январе (78–100%). Наименее увлажненные в течение всего года площадки, расположенные в остепненной зоне вблизи побережья озера Байкал, далее идет гольцовый пояс и площадка, находящаяся на территории зарастающей гари. Перераспределения в процентном соотношении между площадками в течение года не отмечается.

Формирование условий режима температуры воздуха, на исследуемой территории, в значительной степени зависит от высоты местности. С увеличением высоты отмечается уменьшение средних годовых значений температуры – расположенные у подножья площадки характеризуются положительными значениями средних годовых температур, в гольцовом поясе средние за год температуры отрицательные. Градиент изменения средней годовой температуры с высотой по профилю  $0,5^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ . Амплитуды годовых колебаний (разности средних температур за январь и июль) на всех площадках независим от высоты колеблются в пределах  $28\text{--}36^{\circ}\text{C}$ . Различия абсолютных максимума и минимума увеличиваются с высотой. У уреза воды диапазон колебаний срочных температур в течение года составляет  $63^{\circ}\text{C}$ , в гольцовой зоне  $73^{\circ}\text{C}$ . Зимой, в период максимально интенсивных инверсий температуры воздуха в горно-котловинных ландшафтах Прибайкалья, на юго-восточном склоне Приморского хребта инверсия температуры проявляется только в суточных и срочных значениях.

Начало периода с температурой воздуха устойчиво превышающей  $0^{\circ}\text{C}$ , также зависит от высоты над уровнем моря. Самые ранние даты отмечены на площадке расположенной у уреза воды, на высоте 460 м. Период с температурой воздуха устойчиво превышающей  $0^{\circ}\text{C}$  здесь наблюдается с середины марта. С увеличением высоты даты наступления безморозного периода сдвигаются на более поздние сроки. На высоте 1654 м даты начала безморозного периода приходятся на конец апреля. Амплитуда продолжительности периода с положительной температурой воздуха составляет в среднем 70 дней, с максимальными значениями (220 дней) у уреза воды и минимальными (150 дней) на вершине Сарминского гольца. В распределении сумм положительных температур также наблюдается зависимость от высоты. Средняя сумма положительных температур на склоне  $2035^{\circ}\text{C}$ , максимальная ( $2607^{\circ}\text{C}$ ) отмечена на высоте 460 м (остепненная зона побережья озера Байкал), минимальная ( $1263^{\circ}\text{C}$ ) на высоте 1654 м (гольцовый пояс).

Начало периода вегетации, когда температура воздуха устойчиво превышает  $5^{\circ}\text{C}$ , на площадках наблюдения расположенный у уреза воды до середины рассматриваемого склона (1117 м) приходится конец апреля. Также, на этих площадках, отмечена синхронность наступления дат начала вегетации. С набором высоты даты начала периода вегетации смещаются на более поздние сроки. На вершине Сарминского гольца вегетационный период начинается с конца мая, и имеет продолжительность в среднем 110 дней и сумму температур  $1140^{\circ}\text{C}$ . С уменьшением высоты увеличивается продолжительность вегетационного периода и сумма температур. Максимальные значения (160 дней и  $2460^{\circ}\text{C}$ ) отмечены на площадке наблюдений с высотной отметкой 603 м.

Анализ микроклиматических наблюдений на модельных площадках, расположенных на юго-восточном макросклоне Приморского хребта, позволил уточнить и дополнить некоторые закономерности распределения температурно-влажностных характеристик по территории, полученные другими авторами. Продолжение круглогодичного автоматического мониторинга в сложных географических условиях, с обязательным рас-

ширением сети наблюдений, в дальнейшем поможет более корректно оценить происходящие климатические колебания локального масштаба и их вклад в региональный и глобальный процесс изменений климата.

Работа выполнена в рамках программы НИР Института географии им. В.Б. Сочавы (СО РАН АААА-А21-121012190059-5).

1. Буфал В.В. Условия формирования современного климатического фона // Природопользование и охрана среды в бассейне Байкала. Новосибирск: Наука, –1990. – С. 29–40.

2. Байкал (атлас) / ред. Г. И. Галазий. – М.: Изд-во Федеральной службы геодезии и картографии России, 1993.

3. Василенко О.В., Воропай Н.Н. Автоматический мониторинг температуры и влажности воздуха в горно-котловинных ландшафтах Прибайкалья // География и природные ресурсы. –2022. –Т 43. – № 4. – С. 59–69. DOI: 10.15372/GIPR20220407.

4. V. A. Golubtsov, Yu. V. Vanteeva, N. N. Voropay, O. V. Vasilenko, A. A. Cherkashina and E. P. Zazovskaya Stable Carbon Isotopic Composition ( $\delta^{13}\text{C}$ ) as a Proxy of Organic Matter Dynamics in Soils on the Western Shore of Lake Baikal // Eurasian Soil Science. – 2022. – Vol. 55. № 12, pp. 1700–1713, <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064229322700041>.



## К МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Грачев И.Г., Поздняков А.В.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
post@imces.ru

Представлен новый метод оценки экологической ёмкости экосистем, осуществляемый на основе определения количества аккумулируемой продуцентами соляриной энергии в Дж/м<sup>2</sup>\*год в экосистеме. Исследовались два типа экосистем: самоорганизующаяся экологическая система, эволюционирующая в динамически равновесном, асимптотически устойчивом режиме, и эколого-экономическая энергетически диссипативная с ускорением удаляющаяся от динамического равновесия система. Первая самопроизвольно формируется и развивается в естественных условиях среды, а вторая организуется в границах первой при непосредственном участии человека.

Понятие «экологическая ёмкость» относится к эколого-экономической категории; количественно она определяется объемом аккумулируемой энергии, получаемой за счет фотосинтетической трансформации солнечной энергии и невозобновляемых ее источников в недрах земли. Функции аккумулятора солнечной энергии на земле выполняет эмерджентная совокупность продуцентов, по существу, составляющая фундаментальную основу геоэкосистемы. Ее имманентным свойством является экзистенциальная рента [Pozdnyakov, 2022] – единственный источник энергии, дающий жизнь всем консументам и человеку, а мерой – количество соляриной энергии, накапливаемой в продуцентах и их производных в единицу времени.

Раскрытие сути поставленной проблемы осуществлено на примере Ушайской экосистемы в пределах правобережья реки Ушайка в районе Академгородка (г. Томск). Базисной основой для данной экосистемы является одноименная геоморфоструктура, представленная ограниченным тектоническими разломами выступом коренного фундамента, сложенного разновозрастными структурами Кузнецкого Алатау, Колывань-Томской складчатой зоны и Западно-Сибирской плиты [Парначев и др, 2010].

Территория входит в состав экотона, формировавшегося в границах переходной зоны от темнохвойной тайги к сосново-березовым лесам и лесным лугам [Рожанец и др., 1928]. Основными лесообразующими породами являются сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), береза повислая (*Bétula péndula*), осина обыкновенная (*Pópulus trémula*). В настоящее время заметно увеличивается число представителей лесных пород интродуцентов, завезенных с Уссурийской тайги: лимонник китайский (*Schisandra chinensis*), актинидия (*Actinidia*), манчжурский орех (*Juglans mandshurica Maxim*), черёмуха Маака (*Prunus maackii*); два вида лещины – лещина разнолистная (*Corylus heterophylla*) (из Амурской области) и лещина обыкновенная (*Corylus avellana (L.)*) (Южный Урал); дуб монгольский (*Quercus mongolica*) и Клен американский (*Acer negundo L.*).

Травяной покров характеризуется заметным разнотравьем, особенно на склонах южной экспозиции долины р. Ушайки. Наиболее распространенными видами являются: бор развесистый (*Milium effusum L.*), костяника (*Rubus saxatilis L.*), орляк обыкновенный (*Pteridium aquilinum (L.)*), горошек мышиный (*Vicia cracca L.*), осока дернистая (*Carex cespitosa L.*), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria L.*), чина луговая (*Lathyrus pratensis L.*), лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria (L.) Maxim.*), клевер луговой (*Trifolium pratense L.*), черемуха обыкновенная (*Padus avium Mill.*), герань лесная (*Geranium sylvaticum L.*), ежа сборная (*Dactylis glomerata L.*), хвощ лесной (*Equisetum sylvaticum L.*).

Почвы на исследуемом участке относятся к отделу текстурно-дифференцированных почв, к типу серых почв с хорошо выраженным гумусово-элювиальным горизонтом AEL, и являются типичными для зоны южной тайги Западной Сибири.

Для энергетической оценки экологической емкости была заложена пробная площадь (100 м<sup>2</sup>) на лугово-сосновом биотопе Ушайской экосистемы, характеризующемся спонтанно направленным развитием к асимптотически устойчивому состоянию. В исследовании применялась оценка следующих энергопотенциалов: фитомассы травяной растительности, мортмассы, наземной фитомассы древесной растительности, их корневой системы, а также гумуса и негумифицированного органического вещества почвы. Отбор проб для определения массовой доли органического вещества травяного покрова и мортмассы осуществлялся на площадках 1 м<sup>2</sup> посредством механического сбора, укоса трав и высушивания в муфельной печи при температуре 105 °С. Определение зольности и потери вещества при прокаливании, расчет теплоты сгорания проводились согласно общепринятой методике [ГОСТ 5180-84, 2005; ГОСТ 556661-2013, 2015; ГОСТ 33106-2014, 2016].

Пробы для определения содержания гумуса и углерода в почвенном профиле отбирались в трехкратной повторности на глубинах каждые 10 см слоя почвы. Оценка энергопотенциала почв выполнялась в соответствии с методикой Н. П. Масютенко [Масютенко и др., 2004].

Определение энергопотенциала лесобразующих пород и возраста деревьев основывалось на сравнительной оценке двух методов:

– метод прямой оценки - взятие проб из всех фракций модельного дерева (сосны) и из обнаженной в разрезе корневой системы, а также отбор буравом Пресслера. Образцы анализировались в лаборатории дендрохронологических исследований в ИМКЭС СО РАН на аппарате Lintab с программным обеспечением TSAP. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания для образцов древесной растительности выполнялись в соответствии с ГОСТ 147-2013.

– опытная сравнительная с естественным аналогом оценка на основе аллометрических зависимостей [Усольцев и др., 2022; Демаков и др., 2015].

Энергопотенциал древесных насаждений определялся по формуле 1:

$$E_s = q_s \times (m_{su} + m_{sd}) \quad (1),$$

где  $E_s$  - количество энергии органического вещества древесной породы, Дж;  $q_s$  - удельная теплота сгорания, Дж/кг;  $m_{su}$  - масса надземной части органического вещества, кг;  $m_{sd}$  - масса органического вещества в корнях сосны, кг.

Суммарное количество аккумулируемой энергии в анализируемых биотопах исследуемой экосистемы на заданной площади  $S$ , с учетом формулы (1) определялось по формуле 2:

$$E_{cur} = E_f \times (S - S_f) + E_m \times (S - S_f) + Q_\Gamma \times S + Q_{нв} \times S + E_s \quad (2),$$

где  $E_{cur}$  - количество энергии в органическом веществе Дж/м<sup>2</sup>;  $E_f$  - количество энергии травяной растительности, Дж/м<sup>2</sup>;  $S$  - площадь территории исследуемой экосистемы, м<sup>2</sup>;  $S_f$  - площадь сечения стволов древесных пород, м<sup>2</sup>;  $E_m$  - количество энергии в мортмассе, Дж/м<sup>2</sup>,  $Q_\Gamma$  - запас энергии в гумусе, Дж/м<sup>2</sup>;  $Q_{нв}$  - запас энергии в негумифицированном веществе почвы, Дж/м<sup>2</sup>,  $E_s$  - количество энергии органического вещества древесных насаждений, Дж.

Результаты исследований представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Оценка экологической емкости лугово-соснового биотопа Ушайской экосистемы**

Компонент экосистемы	Метод прямого расчета «in situ»		По аллометрии В. А. Усольцева		По аллометрии Ю. П. Демакова	
	Масса, т/га	Энергия Дж/га	Масса, т/га	Энергия Дж/га	Масса, т/га	Энергия Дж/га
Травяной покров, $E_f$	1,57	$28,65 \cdot 10^9$	1,57	$28,65 \cdot 10^9$	1,57	$28,65 \cdot 10^9$
Морт-масса, $E_m$	5,15	$95,61 \cdot 10^9$	5,15	$95,61 \cdot 10^9$	5,15	$95,61 \cdot 10^9$
Наземная фитомасса сосны обыкновенной, $E_{su}$	998,34	$18427,25 \cdot 10^9$	1173,62	$21662,50 \cdot 10^9$	838,48	$15476,60 \cdot 10^9$
Корневая система сосны обыкновенной, $E_{sd}$	363,73	$6713,69 \cdot 10^9$	222,99	$4115,87 \cdot 10^9$	271,18	$5005,38 \cdot 10^9$
Гумус в почве, $Q_G$	123,80	$2680,30 \cdot 10^9$	123,80	$2680,30 \cdot 10^9$	123,80	$2680,3 \cdot 10^9$
Негумифиц. органическое вещество почв, $Q_{NB}$	55,83	$1051,80 \cdot 10^9$	55,83	$1051,80 \cdot 10^9$	55,83	$1051,8 \cdot 10^9$
Экологическая емкость, $E_{cur}$	1548,42	$28997,30 \cdot 10^9$	1582,96	$29634,73 \cdot 10^9$	1296,01	$24338,34 \cdot 10^9$

По итогам проделанной работы установлено, что максимальным энергопотенциалом обладают насаждения сосны обыкновенной, в которых накопленная энергия за 59 лет равна  $25140,94 \cdot 10^9$  Дж/га, что составляет 86,7 % от всей энергии органического вещества исследуемого участка. На долю почвы приходится около 12,87 % органического вещества, аккумулированного в экосистеме за период формирования около 6000 лет: в гумусе содержится  $2680,30 \cdot 10^9$  Дж/га (9,24 %), в негумифицированном органическом веществе  $1051,80 \cdot 10^9$  Дж/га (3,63 %). Относительно низкие показатели характерны для энергетических потенциалов фитомассы травяной растительности  $28,65 \cdot 10^9$  Дж/га и мортмассы  $95,61 \cdot 10^9$  Дж/га, процесс аккумуляции энергии в которых осуществляется преимущественно в вегетационный период. На момент исследования экологическая емкость лугово-соснового биотопа Ушайской экосистемы оценивается в  $28997,30 \cdot 10^9$  Дж/га.

Исследование поддерживается Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научных тем: «Динамические и эволюционные процессы в природных экосистемах Сибири: индикаторы, мониторинг, прогноз», FWRG-2021-0003; «Развитие системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых газов болотных и лесных экосистем Западной Сибири», FWRG-2022-0001.

1. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартиформ. 2005.
2. ГОСТ Р 55661-2013 Топливо твердое минеральное. Определение зольности. М.: Стандартиформ. 2014.
3. ГОСТ 147-2013 (ISO 1928:2009) Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания. М.: Стандартиформ. 2015.
4. ГОСТ 33106-2014 (EN 14918:2009) Биотопливо твердое. Определение теплоты сгорания М.: Стандартиформ. 2016.
5. Демаков Ю. П., Пуряев А. С., Черных В. Л., Черных Л. В. Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 2 (26). С. 19–36.
6. Масютенко Н.П., Шеховцова В.В., Шеховцов В.И. Научные основы и методы оценки энергетического состояния почв в агроландшафтах. Курск: ВНИИЗиЗПЭ. 2004. 60 с.
7. Парначёв В.П., Парначёв С.В. Геология и полезные ископаемые окрестностей города Томска: Материалы к полевой геологической экскурсии: Справочное пособие. Томск: ТГУ. 2010. 144 с.
8. Рожанец М.И., Рожанец-Кучеровская С.Е. Почвы и растительность окрестностей г. Томска: с картой почв и растительности. Томск. 1928. С. 315–405.
9. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Норичин Д.В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесобразующих пород Урала // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 1(80). С. 4–14.
10. Pozdnyakov A.V. Global existential rent – the basis of sustainable development of civilization // Abstracts of reports 5th International Conference «Resources, Environment and Regional Sustainable Development in Northeast Asia». Irkutsk: Publishing House of the S.B. Sochava Institute of Geography SB RAS. 2022. P. 70.

## ВОДНЫЕ ОБЪЕКТЫ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

*Давыдова Н.Д., Знаменская Т.И.*

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, [davydova@irigs.irk.ru](mailto:davydova@irigs.irk.ru)

Глобальное потепление климата остается актуальной проблемой вследствие его негативных последствий на Земле (Изменения ..., 2002). В разных регионах проявление этого феномена не однозначно. За последние 100 лет (1907-2006 гг.) увеличение температуры в целом по России составило 1,29 °С при среднем глобальном значении  $0,74 \pm 0,18$  °С. В последнее время (1976-2018 гг.) по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды скорость роста среднегодовой температуры воздуха составила 0,47 °С за 10 лет, что в 1,5 раза больше средней скорости потепления над сушей земного шара. Наибольшее повышение температуры (до 1,4 – 1,6 °С) отмечено в районах Сибири, Дальнего Востока и южной части Урала (Изменения..., 2012).

Одной из причин, влияющей на температуру атмосферы Земли, считается повышение концентрации парниковых газов, прежде всего углекислого газа (Будыко, 2002), которая вероятней всего может быть дополнительной, а главной – факторы орбитального характера. Так, согласно космогонической теории М. Меланковича (1939) температура атмосферы Земли зависит от закономерных изменений расположения Земли относительно Солнца и колебаний солнечной активности. При анализе ряда инструментальных измерений, подготовленного группой специалистов Британской метеорологической службы температуры воздуха и данных реконструкции солнечной активности по числам Вольфа, О.М. Покровский (2010) пришел к выводу, что положительные тенденции изменений температуры в среднем с лагом (примерно в 10 лет) соответствуют медленному увеличению солнечной активности. Автор обращает внимание на то, что на фоне известных науке 60-70 летних флуктуаций температурный тренд остается неизменно положительным в течение последних 350 лет и возможно сохранится таковым далее. То, что климат на Земле непосредственно зависит от астрофизической цикличности, находит также отражение в периодичности событий долговременного масштаба на планете, в том числе геологических (Параев, Еганов, 2013). С позиций природно-климатических изменений авторами проанализирована динамика катаклизмов, зафиксированных в геологической летописи. Они полагают, что наша планета находится в переходной фазе – начале кайнозойской весны, которая ознаменовалась резким (в масштабе геологического времени) глобальным потеплением, активным вулканизмом и землетрясениями, засухами и пожарами, ливнями, снегопадами и наводнениями.

При непостоянстве во времени и пространстве климатических показателей важно знать, насколько велики и длительны их изменения. Значение климата трудно переоценить, так как основные его составляющие – тепло и влага – являются лимитирующими факторами развития биосферы. Соотношением тепла и влаги обусловлено существование географических зон на Земле и соответственно определяет особенности режима рек, почвенно-растительного покрова, водных систем и главных экзогенных процессов рельефа образования, то есть формирования ландшафтов в целом. Особое значение оно имеет для аридных территорий.

Цель исследований – на фоне глобального потепления оценить состояние водных объектов степных геосистем Юго-Восточного Забайкалья.

Онон-Аргунское междуречье Юго-Восточного Забайкалья (включая Даурию). К характерным чертам климата данной территории относятся: континентальность, недостаточное увлажнение, обилие солнечного света, островное распространение вечной

мерзлоты и отрицательные среднегодовые температуры, которые варьируют от  $-0,5$  до  $-4,1$  °С. Зима холодная, температура января от  $-24^0$  до  $-34$  °С. Лето начинается с конца мая и продолжается до конца августа. Среднемесячные температуры июля  $18-20$  °С. Абсолютный максимум положительных температур  $40$  °С (Климатический ..., 1958).

В XXI в. климат исследуемой территории существенно изменился. По данным инструментальных измерений метеостанции Борзя в период с 1955-2020 гг. установлен хорошо выраженный положительный температурный тренд, в то время как тренд уменьшения годового количества атмосферных осадков вследствие их увеличения в отдельные годы (часто ливневых) проявляется слабо (рис.). Современный сухой период (1999-2020 гг.) подразделяется на две части: очень сухую и теплую 1999-2011 гг. и умеренно влажную, очень теплую 2012-2020 гг. (Давыдова, 2022). Отмеченная тенденция продолжается.

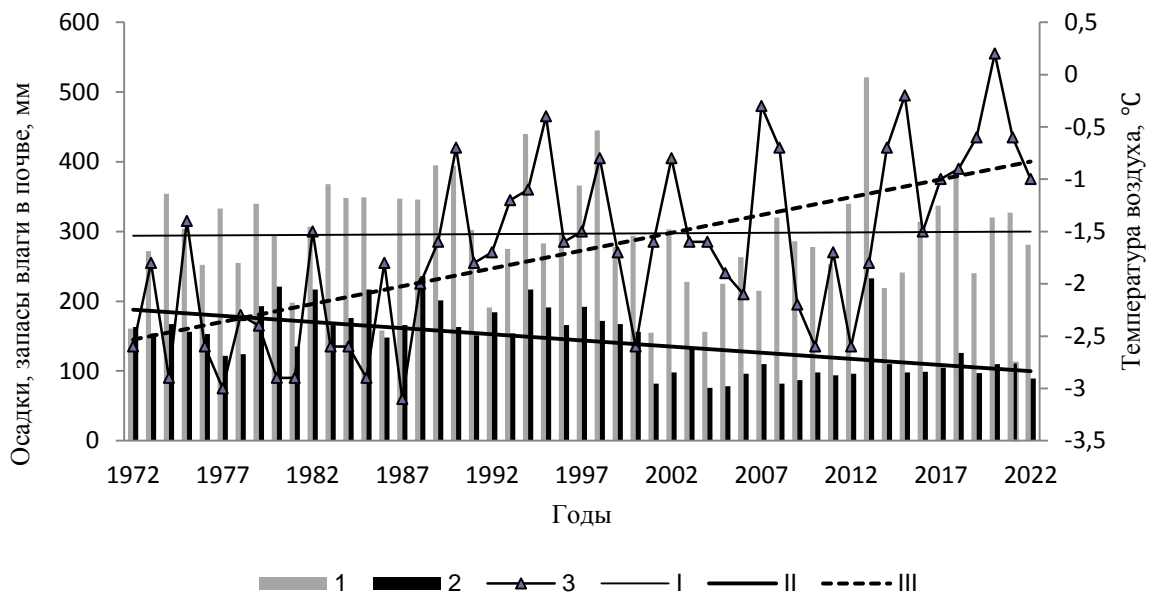


Рисунок 1. Динамика гидротермических показателей Онон-Аргунской степи:  
1 – атмосферные осадки, 2 – запас влаги в слое почвы 0-100 см,  
3 – температура воздуха, I-III – их тренды.

Увеличение тепла и уменьшение количества атмосферных осадков в первый период ярко проявилось в иссушении водных объектов. В 2004 г. исчезло озеро Хара-Нор, глубиной 1-2 м и площадью  $6$  км<sup>2</sup>. Со временем усыханию подверглись наиболее крупные в этом регионе Торейские озера. В 2009 г. не стало озера Барун-Торей глубиной в среднем 4 м и площадью  $580$  км<sup>2</sup>. По сообщению гидрологов метеостанции Борзя к 2018 году произошло практически полное усыхание более глубокого озера Зун-Торей. Всего за указанный период в междуречье Онона и Аргуни в солончаки превратилось более половины озерных акваторий. На смежной территории Монголии за первое десятилетие XXI в. полностью высохло 780 малых рек, 590 озер, 1600 минеральных источников (Slynko et al, 2010).

По характеру засоления Торейские озера, как и многие другие на исследуемой территории, относятся к содовым водоемам (табл.). Содовые озера мало распространены в природе и считаются редкими. Формирование их химического состава обусловлено процессом садки солей, зависящего от их растворимости в условиях повторяемости периодов иссушения, промерзания и наполнения водой.

**Таблица 1. Солевой состав воды (мг/дм<sup>3</sup>) озер (Зун-Торей, Барун-Торей, Хара-Нор).**

Год отбора проб	nn	ppH	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CCa <sup>2+</sup>	MMg <sup>2+</sup>	KK <sup>+</sup>	NNa <sup>+</sup>	Сумма ионов
Озеро Зун-Торей, 10 м от берега											
2012	6	9,6	544,5	359,3	1449,9	16,6	225,8	103,0	330,1	3182,3	10348,6
*M <sub>10,3</sub> HCO <sub>3</sub> 30CO <sub>3</sub> 22Cl36SO <sub>4</sub> 12 / Na87											
Озеро Зун-Торей, 100 м от берега											
2012	5	9,8	560,1	3057,9	1527,9	1722,2	55,3	101,9	335,3	3174,7	10185,3
M <sub>10,2</sub> HCO <sub>3</sub> 34CO <sub>3</sub> 13Cl29SO <sub>4</sub> 24 / Na97											
Озеро Барун-Торей											
2012	5	9,7	637,8	2600,1	2020,5	1425,1	66,2	91,4	338,4	3266,0	10082,1
M <sub>10,1</sub> HCO <sub>3</sub> 28CO <sub>3</sub> 14Cl38SO <sub>4</sub> 20 / Na94											
Озеро Хара-Нор											
1974	6	8,6	198,1	1426,8	838,1	1132,8	88,2	95,1	33,9	1583,8	5286,5
M <sub>5,3</sub> HCO <sub>3</sub> 30CO <sub>3</sub> 9Cl31SO <sub>4</sub> 30 / Na89											
2010	8	9,9	430,5	3431,3	527,9	1722,2	99,6	103,1	336,4	3211,9	10472,8
M <sub>10,5</sub> HCO <sub>3</sub> 38CO <sub>3</sub> 10Cl29SO <sub>4</sub> 24 / Na93											
2012	5	9,9	419,7	3403,8	355,3	1929,1	442,4	21,7	119,2	3318,3	10509,4
M <sub>10,5</sub> HCO <sub>3</sub> 38CO <sub>3</sub> 9SO <sub>4</sub> 27Cl26 / Na97											
2013	6	9,2	22,8	587,4	170,2	505,9	44,6	12,9	33,1	559,1	1866,1
M <sub>1,9</sub> SO <sub>4</sub> 41HCO <sub>3</sub> 37CO <sub>3</sub> 3Cl19 / Na95											
2016	9	9,7	365,1	1019,9	33,9	2669,3	223,6	59,4	332,1	2066,1	6669,4
M <sub>6,7</sub> SO <sub>4</sub> 57HCO <sub>3</sub> 17CO <sub>3</sub> 13 / Na93											

\*Формула Курлова

Выявлено, что в условиях испарения и росте минерализации от 5 до 10 г/дм<sup>3</sup> (1974, 2010, 2012 гг.) наблюдалось параллельное увеличение в растворе содержания всех ингредиентов с преобладанием соды и примерно равным количеством хлоридов и сульфатов. В 2013 г. в результате выпадения обильных дождей (см. рис.), водой пополнились в основном наиболее мелкие озера, и то ненадолго. Соотношение в них ионов изменилось в сторону увеличения сульфата вероятно за счет растворения CaSO<sub>4</sub>, имеющего растворимость 2,05 г/дм<sup>3</sup>. В первую очередь в осадок выпадают соли щелочноземельных элементов в последовательности CaCO<sub>3</sub> → MgCO<sub>3</sub> → CaSO<sub>4</sub> → SrSO<sub>4</sub>, имеющие на один или два порядка меньшую растворимость в воде по сравнению с солями натрия. На этот процесс влияет температурный режим, когда зимой низкие температуры способствуют осаждению соды, а их повышение в летний период осаждению CaCO<sub>3</sub>, который отличается от солей натрия особенно низкой растворимостью (0,0066 г/ дм<sup>3</sup>) (Большая..., 2020). С повышением температуры и уменьшением CO<sub>2</sub> карбонатная соль кальция первой оседает из раствора на дно водоема вместе с илистыми частицами и при увеличении водности озера остается в осадке. На это указывают также низкие содержания Ca<sup>2+</sup> в воде озер и, напротив, несравнимо большее количество солей натрия (карбонатов, гидрокарбонатов, сульфатов, хлоридов). Так происходит карбонизация донных отложений.

Особенностью климата Юго-Восточного Забайкалья является цикличность, которая проявляется в чередование сухих и влажных временных периодов. Современный период иссушения (1999-2022 гг.) наиболее длительный в течение последних 100 лет. Он характеризуется постепенным ростом температуры и неоднозначным поступлением количества атмосферных осадков. За последние 10 лет среднегодовое значение температуры повысилось и в среднем составило -1,03 °C по сравнению с прежней величиной (-

2,54). Вследствие этого весь период подразделяется на две части: очень сухую и теплую (1999-2011 гг.) и умеренно влажную, очень теплую (2012-2022 гг.). Изменение гидротермических условий сопровождалось негативными преобразованиями в объектах и компонентах геосистем исследуемой территории, которые наиболее ярко проявились в первой половине. Особенно катастрофически это сказалось на древесных насаждениях, запасах влаги в почвах и воды в озерах вплоть до полного их исчезновения. На их месте под действием испарительного барьера (Давыдова, 2005) образовались солончаки содово-сульфатного и содово-хлоридно-сульфатного типов засоления группы натрия. Они активно заселяются галофитами от периферии к центру озерных котловин. Остатки воды, напротив, преимущественно содового засоления с участием сульфатов и хлоридов.

1. Большая таблица растворимости. Электронный ресурс <https://www.un.org/ru/sections/issues-depth/olimate-change.html> (обращение 29.06.2019).
2. Будыко М.И. Глобальное потепление // Изменения климата и их последствия. Санкт-Петербург: Наука, 2002. С. 7-12.2.
3. Давыдова Н.Д. Ландшафтно-геохимические барьеры и их классификация // География и природные ресурсы. 2005. № 4. С. 24–30.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 год. М.: Росгидромет. 2019. 79 с.
5. Изменения климата и их последствия. Санкт-Петербург: Наука, 2002. 269 с.
6. Климатический справочник СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1958. Вып. 23, Ч. 1. 288 с.
7. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. М.-А.: ГОНТИ, 1939.
8. Параев В.В., Еганов Э.А. Глобальные природно-климатические катаклизмы в истории Земли. Возможная их природа // Геоэкологические и геоинформационные аспекты в исследовании природных условий и ресурсов Науками о Земле. Материалы междунар. научно-практ. конф. «VII Жандаевские чтения». Алматы: «Казак университети», 2013.- С. 266-270.
9. Покровский О.М. Анализ факторов изменения климата по данным дистанционных и контактных измерений // Исследования Земли из космоса. 2010. № 5. С. 11-24.
10. Davydova N.D. Change in the Components of Steppe Geosystems in the Southwestern Transbaikal Region with Climate warming // Arid Ekosystems. 2022, Vol. 12, № 1. Pp. 1-7.
11. Slynko Yu.V., Dulmaa F., Dgebuadze Yu.Yu., Erdenebat M., Mendsaikhan B., Karabanov D.P. Fishes of Mongolia: fauna, zoogeography, current state of populations, conservation // Ecological consequences of biosphere processes in the ecotone zone of Southern Siberia and Central Asia: Proceedings of the International Conference. Oral reports. Ulaanbaatar: Bembi san Publishing House, 2010. Vol. 1. P. 92-94.



## ЭМИССИЯ МЕТАНА ИЗ ПРИРОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

Казанцев В.С.<sup>1</sup>, Кривенок Л.А.<sup>1</sup>, Чербунина М.Ю.<sup>2</sup>, Велиев А.А.<sup>3</sup>, Ларина А.В.<sup>1</sup>,  
Котов П.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, kazantsev@ifaran.ru,  
krivenok@ifaran.ru, larin.arina2003@gmail.com

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
cherbuninamariya@gmail.com

<sup>3</sup>Заполярный государственный университет им. Н.М. Федоровского, г. Норильск,  
Anvar2248@yandex.ru, kotovpi@norvuz.ru

Проблема изменения климата, основная причина которой – увеличение в атмосфере доли парниковых газов, остается одной из наиболее актуальных на данный момент [1]. Имея очень высокий потенциал глобального потепления по отношению к углекислому газу, метан является одним из ключевых парниковых газов. Его источники могут быть как природного, так и антропогенного характера. Инвентаризация источников и стоков метана в совокупности с мониторингом сопутствующих факторов окружающей среды важна как для оценки текущего состояния экосистем, так и с целью построения и верификации прогнозных моделей.

Полевые исследования проводились с 3 по 8 июля 2023 года на территории Норильского промышленного района (Красноярский край). Объектами исследования послужили естественные экосистемы. В экосистемах на минеральных почвах были проведены измерения в трёх точках, включая отроги Путорано, в болотных экосистемах - на семи точках, на озере – в одной точке. Исследовательские площадки находились на удалении до 55 км от Норильска (Рис. 1).

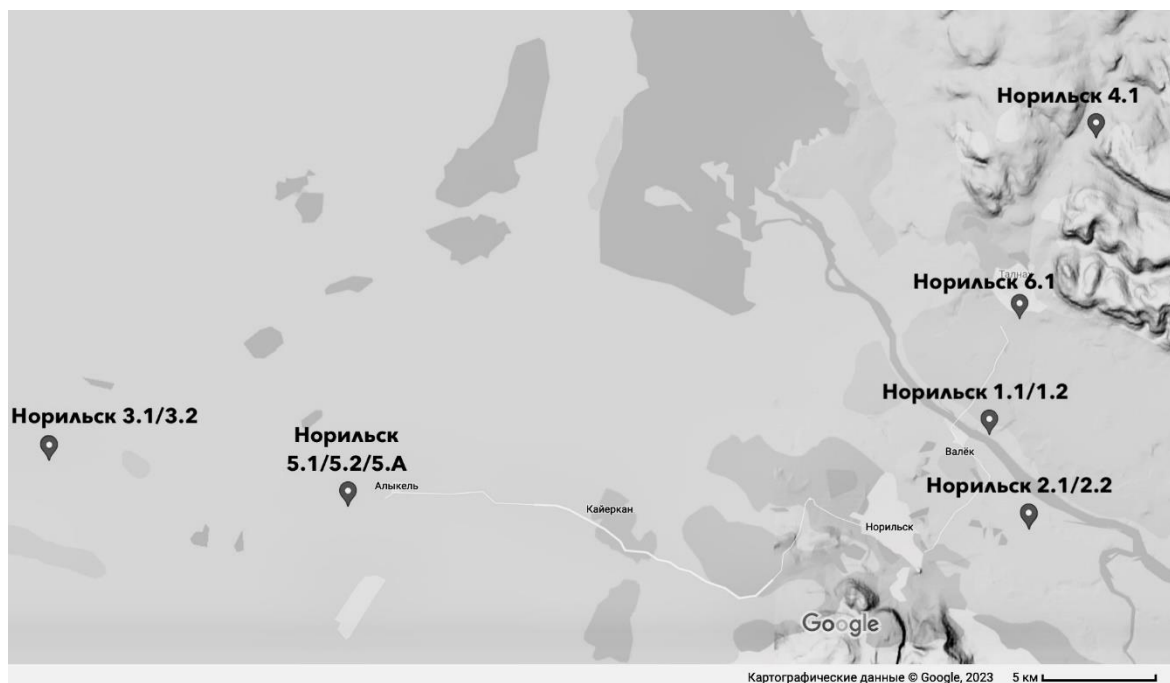


Рисунок 1. Схема расположения точек исследования.

Описание точек измерений удельных потоков метана (УПМ) приведено в таблице 1.

**Таблица 1. Точки измерений удельных потоков метана.**

Точка	Дата	Количество измерений УПМ	Описание точки исследования
Норильск 1.1	07.07.2023	12	Лес, сухая минеральная почва.
Норильск 1.2	07.07.2023	10	Заболоченный ивняк, открытая вода.
Норильск 2.1	03.07.2023	11	Озеро внутри деградирующего торфяника.
Норильск 2.2	07.07.2023	10	Сухой деградирующий торфяник.
Норильск 3.1	04.07.2023	8	Торфяник, сухой торфяной бугор.
Норильск 3.2	04.07.2023	10	Торфяник, обводнённая мочажина.
Норильск 4.1	05.07.2023	10	Сухой минеральный склон горного массива
Норильск 5.1	06.07.2023	10	Торфяник, сухой торфяной бугор.
Норильск 5.2	06.07.2023	8	Торфяник, обводнённая мочажина.
Норильск 5.А	06.07.2023	8	Торфяник, озерко.
Норильск 6.1	08.07.2023	10	Ивняк, сухая минеральная почва.

Измерения проводились методом тёмных статических камер [2].

На поверхность почвы или болота устанавливалось основание с водяным замком, на которое устанавливалась герметичная камера, покрытая светоотражающим материалом для предотвращения нагрева внутреннего пространства (Рис. 2).



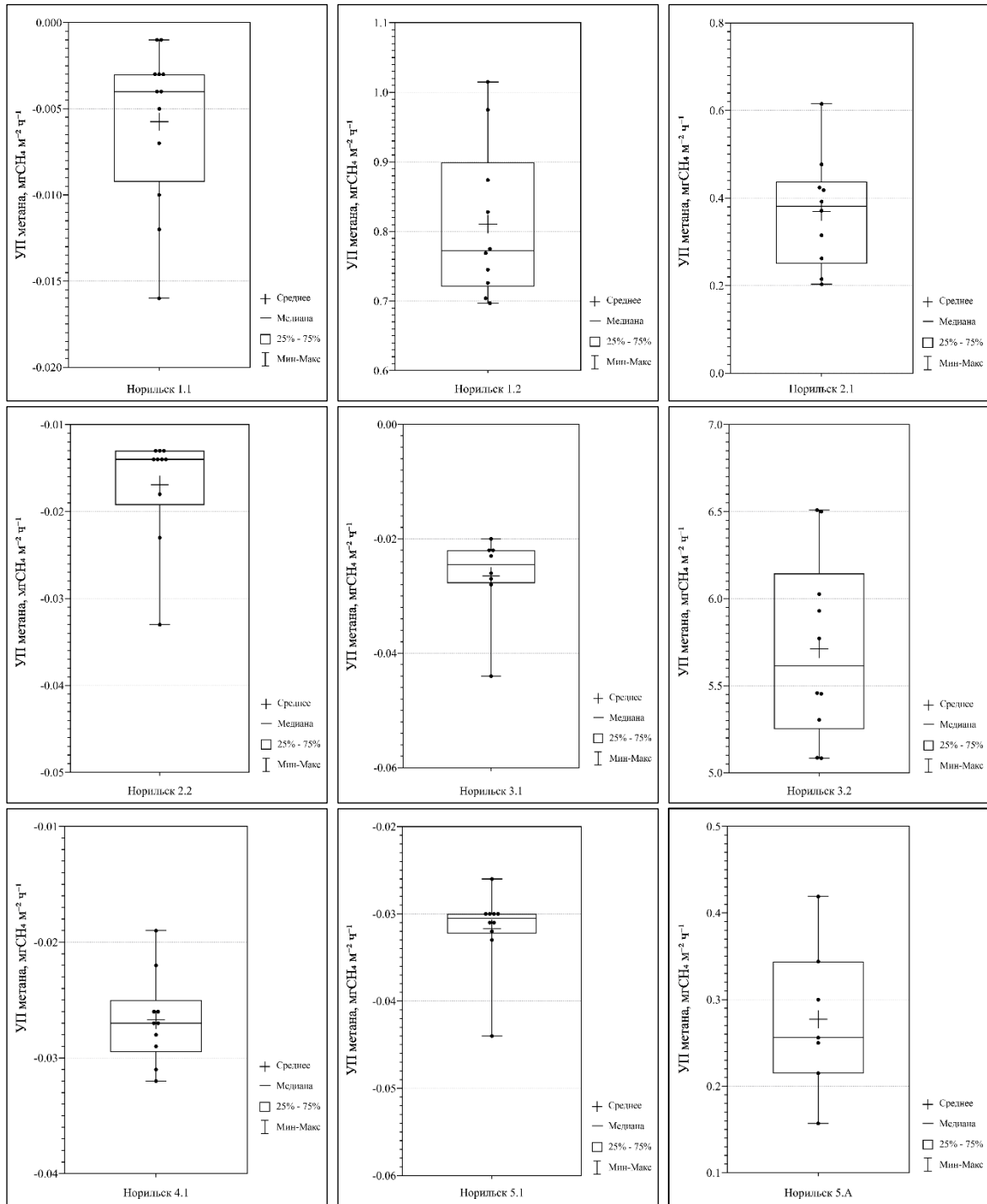
Рисунок 2. Измерение УПМ статической тёмной камерой.

На поверхности озера для измерений применялась плавающая камера, прикреплённая к заякоренной лодке.

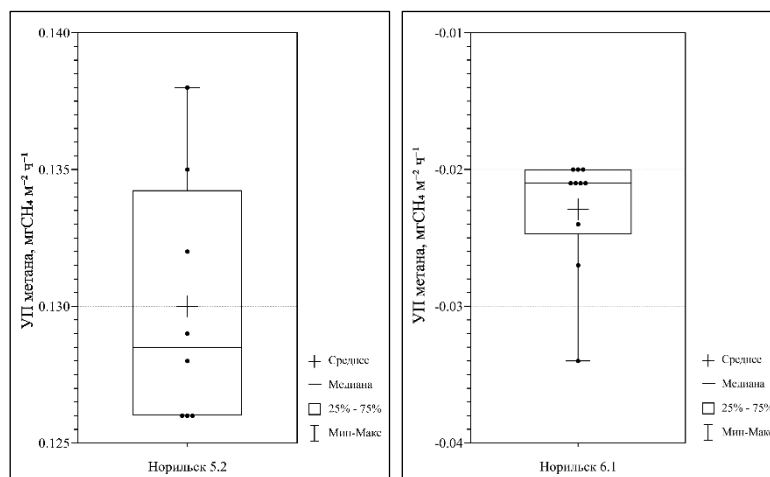
К камере двумя трубками подсоединялся поточный газоанализатор LiCor 7810, который каждую секунду определял концентрацию метана в камерном воздухе. Время экспозиции составляло 4 минуты. На одной точке измерения выполнялись в 8-12 кратной повторности. Во время каждого измерения при помощи портативной метеостанции Kestrel фиксировались параметры приземного слоя атмосферы: температура воздуха, давление

и скорость ветра. Где это было применимо, фиксировался уровень болотных вод и глубина водоёма в точке измерений.

Расчёт УПМ проводился методом линейной регрессии. Описательные статистики значений УПМ представлены на рисунках 3-14.



Рисунки 3-11. Статистические показатели УПМ метана.



Рисунки 12-13. Статистические показатели УПМ метана.

Приведённые статистические характеристики измеренных значений УПМ показывают наличие корреляции интенсивности процессов эмиссии и поглощения метана с условиями увлажнения болотных и минеральных почв. На сухих участках Норильск 1.1/2.2/3.1/4.1/5.1/6.1 значения УПМ отрицательные, что маркирует процесс поглощения метана минеральными и сухими болотными почвами. На остальных точках, располагающихся либо на увлажнённых болотах, либо на водных экосистемах, зафиксированы положительные значения УПМ с максимум в точке Норильск 3.2, для которой характерны значения  $5.6 \text{ mgCH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ час}^{-1}$ .

Исследование выполнено при поддержке ЗГУ имени Н.М. Федоровского в рамках мероприятия Программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Енисейская Сибирь» ТП 35 «Региональная сеть карбоновых полигонов для долговременных наблюдений потоков парниковых газов, тепла и влаги»

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

2. Глаголев М.В., Сабреков А.Ф., Казанцев В.С. Физикохимия и биология торфа. Методы измерения газообмена на границе почва-атмосфера. – Томск: Изд-во ТГПУ, 2010. – 104 с.

## СРЕДНЕСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ПИКОВ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА РЕКАХ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ГОРНОЙ СТРАНЫ

*Кирста Ю.Б., Трошкова И.А.*

Институт водных и экологических проблем СО РАН, г. Барнаул, kirsta@iwep.ru,  
egorkairen@mail.ru

Предлагаемое исследование выполнено на основе впервые разработанной методики интеллектуального анализа (deep process-data mining) сложноорганизованных природных систем и построения высококачественных аналитических моделей их динамики. Интеллектуальный анализ (ИА) находит все более широкое применение в науке, бизнесе, здравоохранении и других областях знаний. ИА включает в себя специальные математические методы и различные постоянно обновляющиеся компьютерные технологии обработки экспериментальных данных. Все они направлены на извлечение потенциально полезной информации, скрытой в больших выборках/базах данных и помогающей прогнозировать ход изучаемых процессов. Разработанная методика ИА обеспечивает извлечение из данных скрытой зашумленной информации, которую невозможно извлечь стандартными статистическими методами. Одновременно определяются количественные характеристики процессов, реально протекающих в природных иерархически организованных системах. С помощью ИА создана аналитическая гидрологическая модель для высококачественного среднесрочного прогноза пиков весеннего (апрельского) половодья с ледоходом на 34 средних и малых реках Алтае-Саянской горной страны.

На *первом этапе* ИА были определены три иерархических уровня организации процессов в анализируемой гидрологической системе водосбора горных рек. Первый – вся территория Алтае-Саянской горной страны с общими для нее мезомасштабными метеорологическими процессами, Второй – водосборные бассейны отдельных рек с выходными створами, на которых измерялся речной сток. Третий – 13 отдельно характеризуемых типов ландшафтов, представляющих собой относительно небольшие, но достаточно автономные гидрологические системы.

На *втором этапе* подготовлены данные для ИА и построения прогнозной математической модели пиков ежегодных весенних половодий в 1951–2020 гг. Здесь выбран месячный шаг для описания динамики метеорологических факторов, а также масштабы карт 1:500000 и 1:200000 для оценки площадей речных бассейнов и их ландшафтов средствами ArcGIS 10.2 and ArcGIS 3D Analyst.

При создании базы метеорологических данных, влияющих на формирование весенних половодий, использованы среднемесячные температуры воздуха и месячные осадки 1951–2020 гг. по 11 реперным метеостанциям Алтае-Саянской горной страны. Расположение метеостанций за пределами 34 анализируемых речных бассейнов сделало невозможным связать речные стоки с непосредственными наблюдениями на этих метеостанциях вследствие крайне неравномерного распределения температур и осадков на исследуемой территории. Поэтому среднемесячные температуры холодного периода всех лет были нормированы на модуль среднемноголетнего значения температуры по каждой метеостанции за январь, а теплого периода – за июль. Все месячные осадки были нормированы на их среднемноголетнее значение по каждой метеостанции за июль. Взяв затем средние по 11 метеостанциям значения характеристик, мы получили пространственно усредненную (обобщенную) динамику нормированных температур и осадков, единую для всей территории Алтае-Саянской горной страны. Отметим, что обратный переход к измерению температур и осадков в градусах Цельсия и миллиметрах легко выполняется через обратное умножение на их среднемноголетние значения.

Ежегодно наблюдаемые пики половодий ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) были нормированы на их средне-многолетние значения по каждому речному бассейну. Были нормированы и площади ландшафтов на соответствующие им площади речных бассейнов. Все это позволило создать однородные выборки нормированных метеорологических (840 среднемесячных температур воздуха и 840 месячных осадков), гидрологических (~300 значений пиков половодий) и пространственных (160 площадей и 160 высот ландшафтов) данных, пригодные для ИА.

На *третьем этапе* ИА выбран балансовый тип модели, составлены ее уравнения, не противоречащие известным физико-гидрологическим законам и закономерностям, после чего выполнен собственно ИА. Для каждого проверяемого варианта модели была составлена система уравнений большой размерности, где каждое уравнение рассчитывало конкретное значение из имеющейся выборки ~300 нормированных пиков половодий. После подстановки в систему наблюдаемых величин пиков вместо рассчитываемых, при помощи пакета прикладных программ MATLAB решена обратная математическая задача с определением значений всех параметров модели и ее невязки (расхождения между рассчитанными и наблюдаемыми пиками). В результате была создана прогнозная математическая модель весенних (апрельских) пиков половодий, соответствующая наилучшему по невязке варианту уравнений.

Для описания неизвестных зависимостей процессов между собой и факторами среды нами использована кусочно-линейная функция  $H$ , форма которой определялась искомыми значениями ее параметров (рис. 1). Уравнение для  $H$  имеет вид:

$$H(X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2, X) = \begin{cases} Y_1 + Z_1(X - X_1), & \text{если } X < X_1 \\ \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}(X - X_1) + Y_1, & \text{если } \begin{cases} X_1 \leq X < X_2 \\ X_1 \neq X_2 \end{cases} \\ Y_2 + Z_2(X - X_2), & \text{если } X \geq X_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $X_1, X_2, Y_1, Y_2, Z_1, Z_2$  – параметры, устанавливаемые в ходе решения обратной задачи;  $X$  – какая-либо переменная модели.

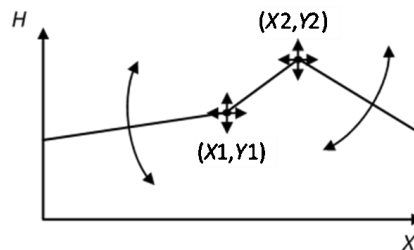


Рисунок 1. Непрерывная кусочно-линейная функция  $H$  с изменяемыми значениями параметров, позволяющая аппроксимировать различные формы зависимостей между процессами и факторами среды (1).

Определение параметров модели принято называть ее идентификацией. После идентификации осуществляется верификация модели на независимых данных. В ИА обе процедуры выполняются «автоматически», так как одновременно анализируется большое количество (34) речных бассейнов и используемые данные наблюдений значительно превышают число параметров модели.

На *четвертом этапе* ИА были оценены точность (адекватность) модели и ее чувствительность к вариациям факторов среды. Для этого предложен критерий:

$$A = S_{\text{dif}} / \sqrt{2} S_{\text{obs}}, \quad (2)$$

где  $A$  – адекватность модели;  $S_{\text{dif}}$  – стандартное (среднеквадратическое) отклонение у невязки модели (разности между наблюдаемыми и рассчитанными данными);  $S_{\text{obs}}$  –

стандартное отклонение для наблюдаемых данных;  $1/\sqrt{2}$  – множитель. При этом  $A$  связана с известным критерием Нэша-Сатклиффа для оценки адекватности математических моделей как  $NSE = 1 - 2A^2$ .

Нами предложен простой метод расчета чувствительности моделей к естественным вариациям входных факторов, исключая влияние ошибок их наблюдений:

$$FS = (A')^2 - (A)^2 = \frac{(S'_{dif})^2 - (S_{dif})^2}{2(S_{obs})^2} = \frac{2(S_{fac})^2}{2(S_{obs})^2} = \frac{(S_{fac})^2}{(S_{obs})^2}, \quad (3)$$

где  $FS$  – чувствительность модели к входному фактору;  $A$  рассчитывается по уравнению (2);  $A'$  – величина  $A$ , полученная из (2) после подстановки в модель случайно перепутанных значений входного фактора, которые сохраняют прежнее статистическое распределение и дисперсию;  $(S_{dif})^2$  – дисперсия невязки модели;  $(S'_{dif})^2$  – та же дисперсия, но полученная после перепутывания значений входного фактора;  $(S_{fac})^2$  – вклад природных вариаций фактора в дисперсию выходной переменной модели;  $(S_{obs})^2$  – дисперсия наблюдаемых значений (дисперсия выходной переменной модели).

$FS$  характеризует чувствительность модели и относительную значимость факторов, выражая их в долях или процентах от дисперсии  $(S_{obs})^2$ . Как и  $A$ ,  $FS$  связана с критерием Нэша-Сатклиффа  $FS = (NSE - NSE')/2$ , где  $NSE'$  рассчитываются подобно  $A'$  в (3).

На *пятом этапе* ИА оценено прикладное качество разработанной модели (значения  $A$  и  $NSE$ ), у которой значения важных параметров уточнены для конкретного объекта и выбранного периода времени через повторное решение обратной задачи.

Полученная в результате ИА модель для прогнозов пиков весенних половодий имеет вид:

$$Q^i = H(c_1, c_2, 1, 1, c_3, c_4, P_1) \{ \sum_k a_k S_k^i P_1 H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) + \sum_k b_k S_k^i P_2 H(c_5, c_6, 1, 1, c_7, c_8, T_2) H(c_9, c_{10}, 1, 1, c_{11}, c_{12}, h_k^i) \} + d, \quad (4)$$

где  $Q^i$  – ежегодно прогнозируемое значение пика половодья для выходного створа речного бассейна  $i$ ,  $i=1-34$ ; первое и второе слагаемые в правой части (4) соответствуют вкладам осенних (IX–XI) и зимних (XII–III) месяцев соответственно;  $a_k, b_k$  – параметры, характеризующие вклад  $k$ -го ландшафта за соответствующие месяцы,  $k=1-13$ ;  $S_k^i$  – нормированная площадь  $k$ -го ландшафта бассейна  $i$ ;  $h_k^i$  – высота ландшафта, метры н.у.м.;  $P_1, P_2$  – отклонения нормированных месячных осадков от их среднемноголетних значений в среднем за осенние и зимние месяцы соответственно;  $T_2$  – отклонение нормированных среднемесячных температур воздуха от среднемноголетнего значения за зимние месяцы;  $H$  – кусочно-линейная функция (1);  $c_{1-4}, c_{5-8}, c_{9-12}$  – параметры, характеризующие влияние осенних осадков  $P_1$  и зимней температуры воздуха  $T_2$  на величину пиков, а также высоты ландшафтов  $h_k^i$  на количество осадков;  $d$  – постоянная доля стоков ( $d \leq 1$ ), одинаковая для всех бассейнов и характеризующая потери талых вод на промачивание почв и просачивание в трещиноватые горные породы.

Одновременный анализ  $13+13=26$  различных гидрологических процессов с 39 параметрами в (4) при решении обратной математической задачи представляет собой собственно ИА имеющихся гидрологических данных. Оценка прикладной адекватности модели (4) дала значение  $NSE=1-2A^2=0,78$ , отвечающее высокому качеству гидрологических моделей ( $0,75 < NSE \leq 1,0$ ) и даже уникальному для прогнозных моделей половодий на горных реках.

На рисунке 2 представлены полученные зависимости пиков половодий от метеоусловий предшествующей осени и зимы. Очевидно, что осенние осадки в разной степени увлажняют уходящие в зиму почвы и, тем самым, опосредованно влияют на интенсивность весеннего половодья. Рисунок 2а характеризует увеличение пиков весенних половодий с увеличением как осенних, так и зимних осадков. При росте осенних осадков и большем промачивании ими почв все меньше талых вод поступает в почвы весной, а

значит их сток в реки растет. Влияние зимних осадков на речной сток очевидно и объяснений не требует.

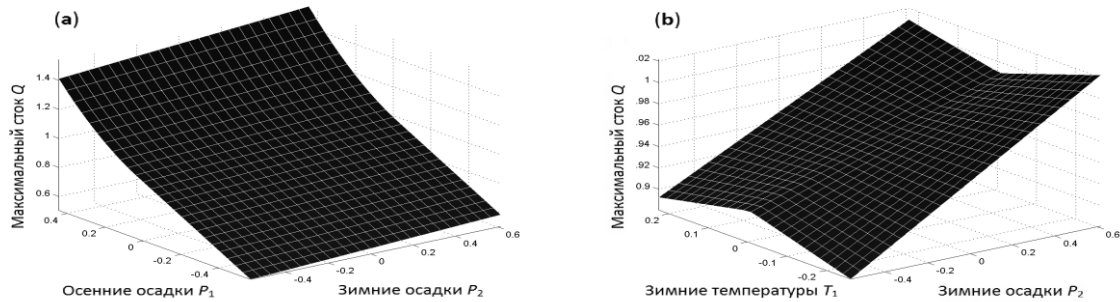


Рисунок 2. Зависимость пиков весенних половодий от осадков и температур воздуха (**a** – влияние осенних ( $P_1$ ) и зимних ( $P_2$ ) осадков, **b** – влияние зимних температур  $T_2$ ).

После холодных зим и малых осадков пики растут с зимними температурами (рис. 2b) из-за все слабее промерзшего снежного покрова, быстрее тающего весной. После теплых зим и малых осадков пики, наоборот, уменьшаются с температурой из-за потерь талых вод в быстро оттаивающие почвы. После холодных зим и больших осадков пики также уменьшаются с температурой из-за потерь талых вод на промачивание слабо промёрзших почв. После теплых зим и больших осадков пики растут с температурой из-за скатывания талых вод в реки со все сильнее увлажненных за зиму почв. Нами также выполнена независимая оценка степени влияния апрельских температур воздуха и осадков на пики весенних половодий (рис. 3).

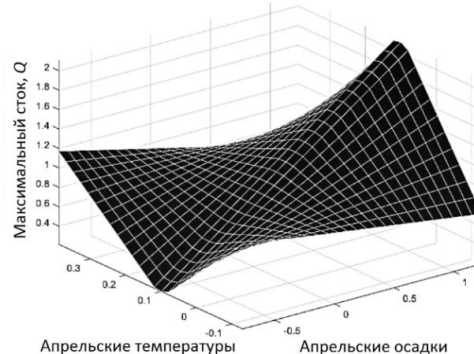


Рисунок 3. Зависимость пиков половодий от температур воздуха и осадков в апреле.

Мы видим, что при низких температурах и малых осадках (снег) пики убывают с ростом температур из-за потерь талых вод в быстрее оттаивающие почвы. При высоких температурах и малых осадках пики растут с температурой из-за таяния снежного покрова. При низких температурах и больших осадках (снег) пики растут с температурой из-за слабого оттаивания и промачивания почв. При высоких температурах и больших осадках пики, наоборот, убывают с температурой из-за активного оттаивания и промачивания почв талыми водами.

Оценена также чувствительность  $FS$  пиков весенних половодий к естественным вариациям факторов: осенне-зимних осадков (дают 29% дисперсии пиков), ландшафтной структуры (14%), зимних температур воздуха (0,8%), а также еще отсутствующих при выполнении прогнозов апрельских осадков (22%) и температур (6%).

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (грант 22-27-00058).



## ОРГАНИЗАЦИЯ БАЛАНСОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВЫНОСОМ УГЛЕРОДА ВОДНЫМИ ПОТОКАМИ НА ТОМЬ-ЯЙСКОМ МЕЖДУРЕЧЬЕ

*Копысов С.Г., Кузнецов А.С.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
wosypok@mail.ru

Вода является наиболее эффективным растворителем, поэтому в природе вода всегда является раствором. Томь-Яйское междуречье является хорошо дренируемой территорией, а потому содержание углерода в воде должно отражать его вынос с речным стоком.

Для исследуемой территории зональным типом ландшафта является темнохвойная тайга с разной степенью деградации и восстановления. Поэтому широко распространены и разного возрастного состояния производные лиственные леса. Почвообразующими породами являются тайгинские глины, перекрытые с поверхности лессовидными суглинками с глубиной залегания карбонатов более 2 м. В долинах и лощинах почвы формируются в теле делювиальных отложений. Высокая неоднородность почвенного покрова определяется прежде всего рельефом. Для интенсивно дренируемых поверхностей характерно формирование глубокооподзоленных дерновых или светло-серых почв с невысоким содержанием гумуса и небольшой мощностью гумусового горизонта (5-15 см). На плоских и пологих склонах господствуют серые, а в депрессионных поверхностях темно-серые и даже луговые оподзоленные почвы с мощностью гумусового горизонта до 40 см. Особенностью почв территории полигона является высокая активность биологических процессов, обеспечивающая стабильно высокую биопродуктивность при невысоком содержании элементов питания. В лесных экосистемах почвы характеризуются неглубоким и поздним промерзанием.

В долине реки Ушайка имеются не учитываемые методами дистанционного зондирования болотца являющиеся аккумуляторами выносимого из дренируемых биогеоценозов углерода.

С целью изучения миграции соединений углерода с почвенными водами, атмосферными выпадениям в 2023 году в окрестностях Аркашево (56,5<sup>0</sup> с.ш., 85,3<sup>0</sup> в.д) было установлено 10 осадкомеров для сбора дождевых вод. Осадкомеры представляют собой пластиковую трубу диаметром 10 см забуренную в грунт. Сверху на трубе закреплена пластиковая воронка диаметром 18,5 см с тканевым ситечком из органзы. Сбор воды осуществляется в обрезанные бутылки закрепленные в полиэтиленовых пакетах в верхней части пластиковой трубы. Половина осадкомеров установлена под кронами, а другая в межкроновом пространстве. На сегодняшний день количество осадкомеров не соответствует минимальным требованиям методического руководства: должно быть не менее 12 осадкосборников под пологом леса (размещая их систематическим, случайным образом или с учетом распределения древесных крон (под кронами и между кронами деревьев)), и не менее 6 осадкосборников на открытом пространстве. Площадь установленных осадкосборников 272 см<sup>2</sup> или 1/37 м<sup>2</sup>. Площадь стандартного осадкомера 227 см<sup>2</sup>, а поэтому при использовании стандартного мерного цилиндра от осадкомера, измеренное количество воды делится на 10 и умножается на 0,89 для учета разности площадей воронки и стандартного осадкомера. В результате получим сколько литров атмосферных осадков выпадает на 1 м<sup>2</sup>, что соответствует мм слоя выпавших осадков. Оценка поступления элементов в экосистему с осадками будет проводиться с учетом площади подкроновых и межкроновых пространств.

Химический состав осадков существенно меняется пока проходит сквозь кроны деревьев, главным образом по двум причинам: смыв частиц и аэрозолей с поверхности деревьев при вымывании и поглощение или выделение ионов растительными тканями. Сбор первых анализов очень наглядно это показал — через цветовой оттенок воды. По первым полученным нами данным: под кроной собирается осадков 2-2,5 раза меньше, чем в межкрупном пространстве.

В дальнейшем число осадкосборников будет увеличено до необходимого путем размещения их под кронами доминирующих видов деревьев и в межкрупных пространствах, чтобы отразить варьирование химического состава дождевых вод внутри биогеоценозов. Выбранная площадка интенсивного мониторинга расположена в полидоминантном лесу. Поэтому для отбора осадкосборники размещаются в проекции середины кроны дерева (кедра, ели, пихты, осины).

Снег интегрально накапливает атмосферные осадки за зимний период. Для отбора проб снега использовался стандартный снегомер-плотномер ВС-43. По результатам снегомерной съемки от 22.03.2023 года установлено, что на открытых участках средняя высота снега 70 см, плотность 187 кг/м<sup>3</sup>, запас воды в снежном покрове 130 мм, а содержание углерода 0,9 г/м<sup>2</sup>. В кедровнике средняя высота снега 52 см, плотность 185 кг/м<sup>3</sup>, запас воды в снежном покрове 98 мм, а содержание углерода 0,53 г/ м<sup>2</sup>. В пихтарнике средняя высота снега 51 см, плотность 217 кг/м<sup>3</sup>, запас воды в снежном покрове 110 мм, а содержание углерода 0,63 г/ м<sup>2</sup>.

Содержание углерода в снежном покрове определено методами традиционной гидрохимии без использования анализатора.

Для оценки баланса поступления и выноса углерода и других элементов в экосистемах необходим отбор почвенных вод с помощью гравитационных лизиметров. Однако, их установка приводит к серьезным длительным изменениям водно-воздушного режима почвы в точке отбора проб. Для минимизации такого воздействия первые 4 установленных лизиметра были врезаны в разные углы передней стенки двух почвенных разрезов под гумусовым и элювиальным горизонтами на глубине 10 и 50 см. Такого количества лизиметров также недостаточно, так как обязательными являются три повторности на каждой глубине. Для мониторинга баланса поступления и выноса элементов из почв рекомендуется установить не менее 10 лизиметров на каждой глубине. Установленные лизиметры изготовлены по конструкции Джона Дерома: состоят из пластиковой воронки диаметром 18,5 см (площадь 272 см<sup>2</sup> или 1/37 м<sup>2</sup>), наполненной промытым кварцевым песком и пластиковой колбы-приемника объемом 2 л.

Отбор образцов проводится 1 раз в 2 недели. В настоящее время отобрано 17 образцов атмосферных осадков. К концу сезона добавится еще 60 проб воды. Отобранные образцы хранятся в холодильнике. Обработка начнется после окончания закупки и запуска анализатора элементного состава «Топаз-НС» в 4 квартале 2023 года. Все необходимые собранные данные будут вноситься в формы для представления данных с пояснениями на веб-странице ВИП ГЗ по адресу <https://ritm-c.ru/>.

В середине июня 2023 года в Томском районе на полигоне «Аркашево» установлена система автоматического мониторинга САМУВ\_250 за уровнем воды в ручье являющимся коллектором почвенных вод. Площадь водосбора ручья 2,1 км<sup>2</sup>. Данные об уровне и температуре воды в ручье передаются автоматически по каналам сотовой связи. Для количественного учета выноса углерода и азота со стоком воды требуется получить зависимость расхода воды от его уровня. Для этого необходимо проводить периодические измерения расхода воды в ручье. Микровертушка гидрометрическая позволяет определять скорость водного потока при малой глубине и низкой скорости потока. К сожалению, в текущем полевом сезоне такую работу выполнить не удалось из-за задержки с приобретением микровертушки. Наш опыт по организации учета стока отражен в работе [3].

Организовано 4 пункта наблюдения за термическим режимом в типичных экосистемах. Периодичность измерений 1 час. Температура измеряется глубине 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 240 см:

АИПТ–393 установлен на высоте 183 м в Кедровом мелкотравно-папоротниковый лесу с елью сибирской и пихтой сибирской. Формула леса 6К3Е1П. Рядом установлены два лизиметра и два осадкомера.

АИПТ–394 установлен на высоте 178 м в Пихтовом папоротниковом лесу с примесью кедра сибирского, лиственницы сибирской и ели сибирской. Древостой достаточно разреженный, формула леса 7П2Лц1К+Е+ед.С. Рядом установлены два осадкомера.

АИПТ–395 установлен на высоте 188 м в Молодом осиновом крупнотравно-снытевом лесу. В древостое присутствуют отдельные старые деревья осины обыкновенной и сосны обыкновенной, а формула леса 7Ос3Б. Рядом установлены два лизиметра и два осадкомера.

САМУВ–250 установлен на высоте 120 м в Темнохвойном разнотравном лесу в долине р.Ушайка, образованный пихтой сибирской и елью сибирской. Рядом в 4 м протекает ручей, на котором начаты наблюдения за уровнями воды (рис. 1) с целью дальнейшей организации учета стока воды, углерода и азота в результате выноса из исследуемых экосистем. На рисунке хорошо видны дождевые паводки после выпадения обильных осадков.

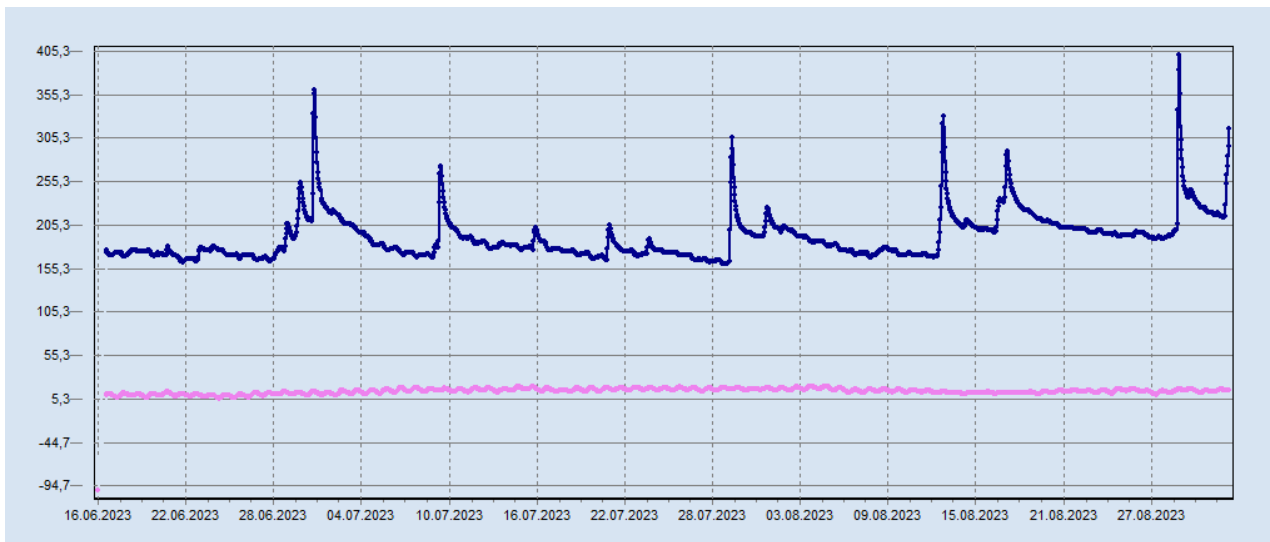


Рисунок 1. Изменение уровня воды (мм) в ручье и температура почвы на глубине 5 см.

Основным вопросом для нас является как располагать осадкомеры и лизиметры. Есть два варианта, как в методическом руководстве на площадке 50 на 50 м, или в различных биогеоценозах исследуемого водосбора. В последнем случае мы будем собирать научный материал для углубленного анализа взаимодействия атмосферных вод с растительностью и почвой. Поэтому мы предлагаем сделать следующее дополнение в методическое руководство: Если наблюдения сопровождаются наблюдениями за стоком воды, то следует располагать осадкомеры и лизиметры в типичных биогеоценозах исследуемого водосбора.

Хотим выразить благодарность разработчикам методических руководств [1,2] за проделанную и очень нужную работу.

Работа выполнена благодаря финансированию по Соглашению № ВИП Г3/23-9.

1. Копцик Г.Н. Ершов В.В., Данилова М.А., Лукина Н.В. Методическое руководство по оценке поступления растворенного органического углерода с атмосферными выпадениями. Отбор и анализ атмосферных выпадений. Версия 1.0 // Москва, 2023. 36 с.

2. Копцик Г.Н. Ершов В.В., Данилова М.А., Лукина Н.В. Методическое руководство по оценке выноса органического углерода с почвенными водами. Отбор и анализ почвенных вод. Версия 1.0 // Москва, 2023. 23 с.

3. 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.

## СУММАРНОЕ ИСПАРЕНИЕ ЗАБОЛОЧЕННОГО ЕЛЬНИКА ЦЕНТРАЛЬНО-ЛЕСНОГО БИОСФЕРНОГО ЗАПОВЕДНИКА ПО ДАНЫМ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Куричева О.А.<sup>1</sup>, Варлагин А.В.<sup>1</sup>, Иванов Д.Г.<sup>1</sup>, Авилов В.К.<sup>1</sup>, Мамкин В.В.<sup>1,2</sup>, Желтухин А.С.<sup>3</sup>, Шуйская Е.А.<sup>3</sup>, Курбатова Ю.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем экологии и эволюции РАН, г. Москва, olga.alek.de@gmail.com (Куричева О.А.), varlagin@sevin.ru (Варлагин А.В.), vitavilov@gmail.com (Авилов В.К.), vadimmamkin@gmail.com (Мамкин В.В.), ivanovdg19@gmail.com (Иванов Д.Г.), kurbatova.j@gmail.com (Курбатова Ю.А.)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва

<sup>3</sup>Центрально-Лесной государственный заповедник, Тверская область, пос. Заповедный, azheltukhin@mail.ru (Желтухин А.С.), forestnauka@gmail.com (Шуйская Е.А.)

Многолетние (06.1998–12.2021) значения радиационного баланса, турбулентных потоков энергии над лесом, метеорологических параметров и уровня почвенно-грунтовых вод получены на станции в ельнике сфагново-черничном в Центральном-Лесном государственном природном биосферном заповеднике (56.461528 с.ш., 32.922083 в.д., 265 м н.у.м.). Станция входит в мировую сеть мониторинга методом турбулентных пульсаций FLUXNET под именем Федоровское (код RU-Fyo) и относится к локальной сети мониторинга биосферно-атмосферного обмена в Тверской области. Организационно станция принадлежит Южно-Валдайской экологической обсерватории «Оковский Лес» Института проблем экологии и эволюции РАН им. А.Н. Северцова. С 1998 г. непрерывные измерения на станции ведет коллектив Лаборатории Биогеоценологии ИПЭЭ РАН при поддержке международных и российских научных проектов.

По данным за 1991–2020 гг. стандартной метеостанции «Лесной заповедник», расположенной в 3.3 км на восток от станции измерений в дер. Федоровское, средняя температура января составила  $-6.9$ , июля –  $17.2$ , года –  $4.7 \pm 0.7^\circ\text{C}$ ; среднее годовое количество осадков составило  $778 \pm 123$  мм. За этот же период статистически значимым был рост средней годовой температуры (тест Манна-Кендалла,  $P < 0.01$ ).

Комплект приборов метода турбулентных пульсаций располагался на вышке высотой 29 м. Для сбора данных о потоках использовался ультразвуковой анемометр Gill Solent R3 (Gill Instruments, UK) и инфракрасный газоанализатор закрытого типа LiCor 6262-3 (Li-Cor Inc., USA). Калибровка газоанализатора проводилась раз в неделю, использовался баллон с известной концентрацией  $\text{CO}_2$ , а также генератор точки росы LI 610 (Li-Cor Inc., Lincoln, USA). Запись велась на частоте 20 Гц, расчет потоков выполнялся при помощи программного пакета EddyPro (LI-Cor Inc.). Круглогодично автоматически с шагом 30 минут фиксировались основные метеорологические параметры: 4 компоненты радиационного баланса ( $R_n$ ), осадки ( $P$ ), температура воздуха ( $T_a$ ) и почвы, относительная влажность воздуха ( $R_h$ ), скорость и направление ветра. Уровень почвенно-грунтовых вод (УПГВ) измерялся в течение вегетационного сезона (апрель–октябрь) вручную в двух трубках под вышкой раз в 2 недели.

Для заполнения пропусков данных на станции в заболоченном ельнике использовались данные о потоках и метеорологических параметрах, полученные на соседних станциях: за 2000–2008 и с 2015 г. – на вышке в неморальном ельнике; в 1998–2000 и с 2015 г. – на болоте «Старосельский мох»; в 1992–1999 и 2002–2021 гг. – данные с шагом 15 мин независимой автоматической метеорологической станции на поляне в урочище Красное. Наличие четырех аналогичных датчиков солнечной радиации (датчик  $R_g$  на вышке в заболоченном ельнике, датчик фотосинтетически активной радиации там же,

датчик Rg на вышке в неморальном ельнике, датчик Rg на независимой АМС в урочище Красное) позволило получить снизить долю пропусков во временном ряде солнечной радиации с 06.1998 по 12.2021 до 0.2%. В температуре воздуха доля пропусков составила 0.4%, в относительной влажности – 0.4%.

В данных о солнечной радиации (Rg) пиковые и неправильные значения выявлены путем сравнения с ФАР, Rg в неморальном ельнике, на АМС Красное, а также сравнением с теоретической расчетной радиацией на верхней границе атмосферы. Значения заполнены по ФАР, неморальному ельнику, АМС Красное, пробелы менее 2.5 ч – линейно, несколько пропусков длиной 3-20 дней – по реанализу ERA и средними значениями в скользящем окне (7 или 14 дней в зависимости от длины пропуска). В данных о Ta и Rh неверные значения найдены путем сравнения с температурой в неморальном ельнике, на метеостанции Красное, на метеостанции "Лесной Заповедник". Пропуски заполнены по значениям в неморальном ельнике, на метеостанции Красное, на метеостанции "Лесной Заповедник" и скользящим средним в окнах 7-14 дней. Пропуски в данных о Rh заполнены по влажности в неморальном ельнике, от прологарифмированных значений Rh на АМС Красное, несколько зимних пробелов в однородных тепературно-влажностных условиях были заполнены значением 100%. Визуальный и статистический анализ данных проводился в пакете WinABD [1].

Доля пропусков в потоке скрытого тепла (LE) составила 14.7%, явного тепла (H) – 10.3%. Среди данных по LE были удалены все с флагами качества 8-9 и проверялись все значения с флагами качества 5-7 (по 9-балльной шкале, где 1 – лучшее, 9 – худшее), а также проводилась визуальная проверка качества и удаление сильно выбивающихся из суточного хода значений, в том числе во время дождей. Заполнение пропусков в потоках производилось в он-лайн инструменте Института Макса Планка REddyProc [2, 3]. Самый длинный пропуск в суммах скрытого и явного тепла длиной 2 месяца 04-06.2002 г. был заполнен по регрессии от солнечной радиации ( $r=0.80$  и  $0.90$  для суточных значений LE и H, соответственно). Для расчета невязки теплового баланса были также заполнены пропуски в компонентах радиации и потоке тепла в почву (G). Невязка теплового баланса по суточным значениям составила около 20%:  $(LE+H)=0.79*(Rn-G)$ . Однако, с мая по август на месячных значениях  $(LE+H)=1.1*(Rn-G)$ , поэтому поправка на невязку теплового баланса не вводилась.

Средние годовые значения метеорологических переменных и потоков за 1998–2020 гг. приведены на рис. 1. Значимые восходящие тренды (тест Манна-Кендалла) выявлены для Rh ( $p=0.02$ ) и LE ( $p=0.04$ ). Рост средней годовой температуры, согласно измерениям над ельником, был на границе значимого ( $p=0.06$ ). Уровень почвенно-грунтовых вод, количество осадков значимо не изменились. На масштабе годовых сумм не было выявлено значимой связи LE ни с одним из рассмотренных параметров. На масштабе суточных сумм значения LE положительно коррелировали с Rg и Ta.

Годовое суммарное испарение с 1999 по 2021 гг. составило  $373\pm 68$  мм, осадки за этот же период –  $791\pm 139$  мм. Испарение составило 47% от средней годовой суммы осадков.

Вариация годовых значений суммарного испарения ( $CV=18\%$ ) была такой же, как осадков ( $CV$  также 18%), хотя для данных 1998-1999 г. ход испарения был значительно более плавным, чем ход осадков [4].

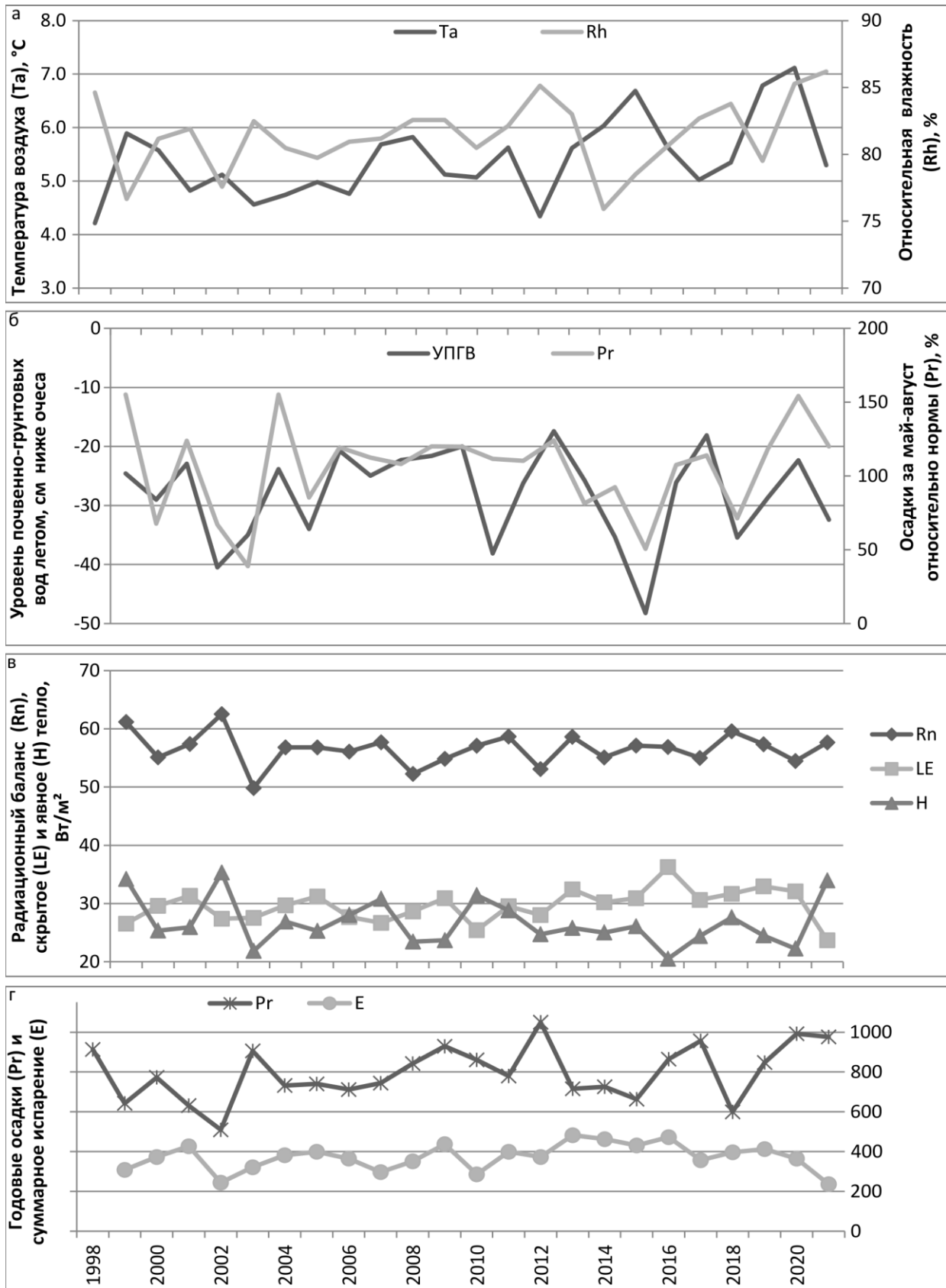


Рисунок 1. Метеорологические параметры (а, б), потоки энергии (в) и потоки воды (г) за 1998-2021 гг. на станции пульсационных измерений в заболоченном ельнике.

Таким образом, годовые значения суммарного испарения по более чем 20-летнему ряду измерений в ельнике сфагново-черничном значительно увеличились на фоне одновременного небольшого (не значимого при имеющейся длине рядов) увеличения среднегодовой температуры. Рост температуры становится значим, если оценивать изменения по ряду с 1991 года. Увеличение суммарного испарения происходило одновременно со значимым увеличением относительной влажности. Рост испарения может быть также связан с изменениями биологических характеристик леса за 20 лет (такими как изреживание древостоя при увеличении возраста или увеличение количества подроста), но эти гипотезы требуют проверки. В 2021 г. резко снизились затраты тепла на сумарное испарение при одновременном увеличении значений явного тепла, что может быть связано с крупными очагами усыхания елей вокруг измерительного комплекса.

Авторы благодарны научному отделу Центрально-Лесного биосферного заповедника за предоставленные данные по уровню почвенно-грунтовых вод. Данная работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6), при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 21-14-00209) и государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1022031600002-1-1.6.19). Анализ данных, интерпретация результатов исследования и подготовка текста работы, выполнены Куричевой О.А., Ивановым Д.Г., Авиловым В.К. и Курбатовой Ю.А. при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6), пульсационные наблюдения и первичная обработка данных в ельнике, выполненные Варлагиным А.В. осуществлялись при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 21-14-00209), первичная обработка данных наблюдений на болоте «Старосельский мох» выполнена Мамкиным В.В. и поддержана государственным заданием Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1022031600002-1-1.6.19).

1. Технологии анализа геофизических временных рядов. Часть.1. Требования к программе обработки / Дещеревский А.В. [и др.] // Сейсм. приборы. – 2016. – Т. 52. – N1. – С.61-82. Часть 2. WinABD – пакет программ для сопровождения и анализа данных геофизического мониторинга // Сейсм. приборы. – 2016. – Т. 52. – N3. – С.50-80.

2. REddyProcWeb, 2015. Online tool. Max Planck Institute for Biogeochemistry. Germany. - Режим доступа: <https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Services/REddyProcWeb>

3. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc / Wutzler T. [et al.] // Biogeosciences. – 2018. – №15. – P.5015-5030.

4. Варлагин А.В., 2000. Транспирация на уровне листа, дерева и сообщества в хвойных лесах [Текст]: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. – М., 2000. – 195 с.



## ДИНАМИКА ИЗОТОПНОГО СОСТАВА КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА В АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКАХ Г. ТОМСКА В 2016-2020 ГГ.

*Маркелова А.Н., Симонова Г.В., Калашикова Д.А.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
marnnaa.levoka@yandex.ru

Изотопные составы кислорода и водорода в атмосферных осадках, а также в метеорных водах в целом, являются источниками информации для изучения прошлых и современных климатических и гидрологических процессов. Это возможно благодаря фракционированию изотопов при испарении, конденсации, образовании ледяных кристаллов, то есть разделению изотопов между пулами воды при переходе из одного агрегатного состояния в другое. Отсюда вытекает связь изотопного состава атмосферных осадков с условиями испарения и транспирации воды, траекториями движения воздушных масс, переносящих влагу, процессами образования облаков и условиями выпадения осадков [1,2].

Цель – выявить и описать особенности динамики изменения изотопных составов кислорода и водорода в атмосферных осадках города Томска в период 2016-2020 г.

В работе были использованы временные ряды суточных сумм осадков, среднесуточных значений температуры и относительной влажности воздуха, полученные в результате обработки данных, предоставленных Геофизической обсерваторией ИМКЭС СО РАН. Там же были собраны суточные пробы атмосферных осадков. В этих пробах измерены соотношения стабильных изотопов кислорода, водорода и объемная активность радиоактивного изотопа водорода – трития.

Соотношения стабильных изотопов  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  и D/H в пробах атмосферных осадков определялись с помощью изотопного масс-спектрометра DELTA V Advantage в сочетании с системой GasBench II (Thermo Fisher Scientific, Германия). Значения изотопного состава кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) и водорода ( $\delta\text{D}$ ) осадков определяли по калибровочным графикам, полученным по международным стандартным образцам VSMOW ( $\delta^{18}\text{O} = 0 \pm 0,02 \text{ ‰}$ ,  $\delta\text{D} = 0 \pm 0,3 \text{ ‰}$ ), SLAP ( $\delta^{18}\text{O} = -55,50 \pm 0,02 \text{ ‰}$ ,  $\delta\text{D} = -427,5 \pm 0,3 \text{ ‰}$ ) и GRESO ( $\delta^{18}\text{O} = -33,40 \pm 0,04 \text{ ‰}$ ,  $\delta\text{D} = -258,0 \pm 0,4 \text{ ‰}$ ). Погрешность определения величин  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  составила  $\pm 0,4 \text{ ‰}$  и  $\pm 1 \text{ ‰}$ , соответственно. Объемная активность трития (А, Бк/л) была измерена с помощью жидкостно-сцинтилляционного спектрометра-радиометра Quantulus 1220 (PerkinElmer, США). Приборы предоставлены центром коллективного пользования ТомЦКП ИМКЭС СО РАН.

Согласно данным наблюдения, за период 2016-2020 гг. количество суток с осадками составило 871. Было собрано 709 суточных проб атмосферных осадков для изотопного анализа. Во всех пробах были определены значения  $\delta^{18}\text{O}$ , в 707 пробах были измерены значения  $\delta\text{D}$ . Объемная активность трития была измерена в пробах, отобранных в период с июня 2019 г. по декабрь 2020 г, всего 102 пробы. Оценка связей между вариациями изотопов в атмосферных осадках и между вариациями изотопных рядов и метеопараметров была выполнена с помощью корреляционного анализа. Значимость коэффициентов корреляции определялась с помощью t-критерия Стьюдента. Для анализа структуры изотопных временных рядов были применены регрессионный и спектральный методы, адаптированные для анализа временных рядов с нерегулярной выборкой. В частности, коэффициенты Фурье рассчитывались методом наименьших квадратов согласно алгоритму Ломба-Скаргла, описанному в работе [3]. Оценка значимости вклада гармонических составляющих в изменчивость изотопных рядов выполнялась с помощью F-критерия Фишера.

Временные ряды данных  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  значений и активности трития в атмосферных осадках приведены на рисунке 1. Коэффициент корреляции между  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  рядами составляет 0,96 и является статистически значимым ( $\alpha=0,01$ ). Корреляция рядов стабильных изотопов с рядом активности трития слабая ( $r=0,22$ ), хоть и является статистически значимой при  $\alpha = 0,05$ .

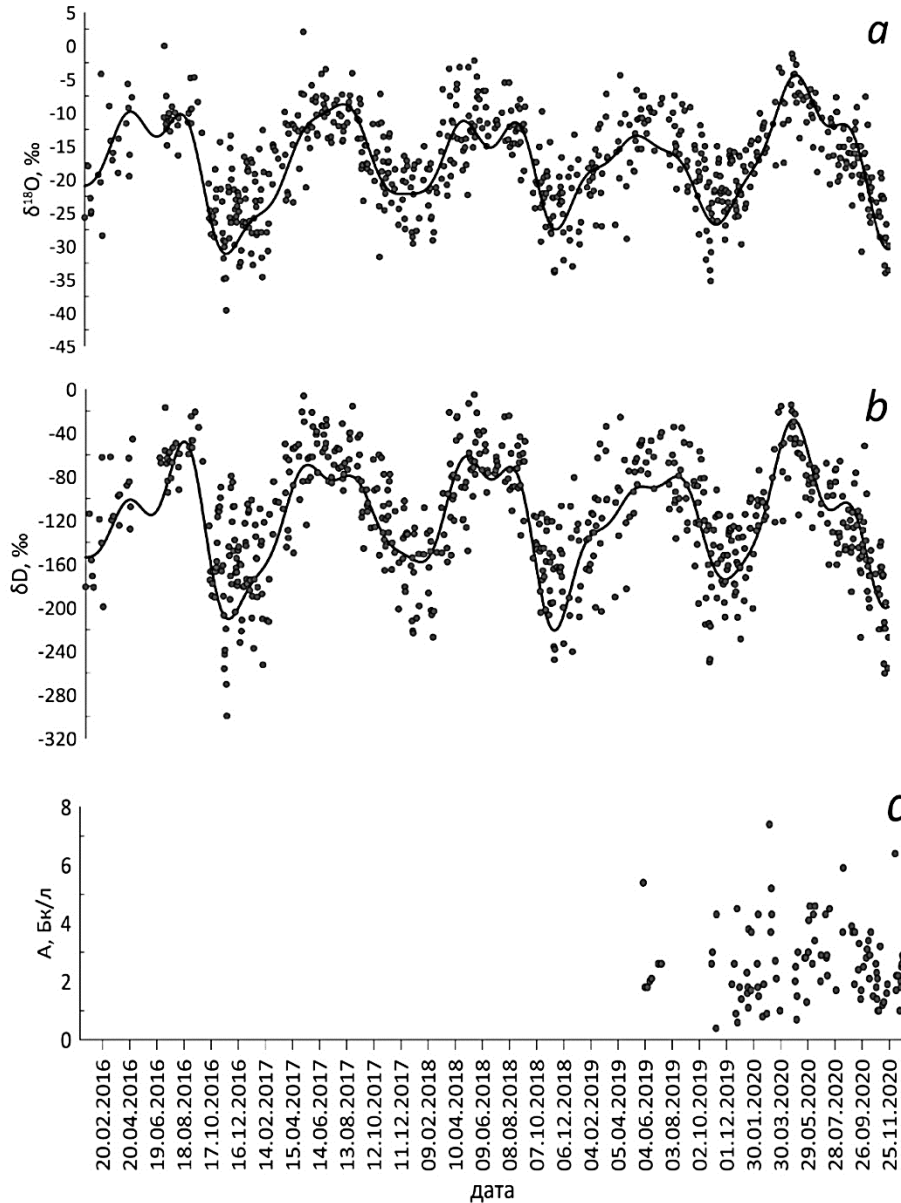


Рисунок 1. Соотношения стабильных изотопов кислорода (а), водорода (б) и объемная активность трития (с) в атмосферных осадках г. Томска. Серыми точками обозначены измеренные значения величин  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ , А; сплошными линиями – тренды.

Среднее значение  $\delta^{18}\text{O}$  в осадках составляет  $-17,4\text{‰}$ , диапазон вариаций вокруг среднего – от  $-39,6\text{‰}$  до  $2,1\text{‰}$ . Среднее значение и диапазон вариаций  $\delta\text{D}$  составляют соответственно  $-118,3\text{‰}$ ; от  $-299,3$  до  $-4,9$ . На рисунке 1 отчетливо видно, что в вариации  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ -значений существенных вклад вносят сезонные компоненты. Спектральный анализ выявил значимый вклад в изменчивость  $\delta^{18}\text{O}$ -ряда гармоник с периодами 811,6; 521,7; 365,2; 187,3; 152,2; 125,9 суток. Их суммарный вклад в дисперсию  $\delta^{18}\text{O}$ -ряда составляет 69 %, максимальный вклад вносит гармонические составляющие с периодом

365,2 суток – 50%. В изменчивость  $\delta D$ -ряда значимый вклад вносят гармонические составляющие с периодами 811,8; 365,2; 228,3; 187,3; 152,2; 125,9 суток. Суммарный вклад этих составляющих в дисперсию  $\delta D$ -ряда составляет 65 %, максимальный вклад 50 %, как и в случае с  $\delta^{18}O$ -рядом, вносит составляющая с периодом 365,2 суток.

Активность трития в осадках в течение 2020 года изменялась в пределах 0,7 — 6,4 Бк/л. Среднегодовые и среднемесячные значения не вычислялись из-за недостаточного объема выборки, так как активность трития была определена менее, чем в половине проб атмосферных осадков. По этой же причине не был выполнен спектральный анализ ряда активности трития. Однако, стоит отметить, что минимальные значения активности трития наблюдались в основном в ноябре, максимальные – в марте, июне и августе. Такое распределение минимальных и максимальных значений согласуется с годовым ходом содержания трития в осадках Северного полушария и объясняется усиленным обменом воздушными массами между стратосферой и тропосферой в весенне-летний период, и более слабым обменом осенью и зимой [1]. Ранее нами было выявлено, что содержание трития в осадках в г. Томске может определяться типом осадков, оказалось, что активность трития в ливневых осадках в среднем выше, чем в обложных [4].

Полученные нами изотопные ряды были сопоставлены с температурой воздуха, количеством осадков и относительной влажностью воздуха в г. Томске. Статистически значимых связей активности трития с этими метеопараметрами не обнаружено. Коэффициенты корреляции между  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$  значениями и метеопараметрами за отдельные сезоны года и за весь период наблюдений представлены в таблице 2.

**Таблица 1. Связь соотношений стабильных изотопов в атмосферных осадках с температурой и количеством осадков в г. Томске.**

Величина	Коэффициент корреляции				
	декабрь-февраль	март-май	июнь-август	сентябрь-октябрь	2016-2020 гг.
	Температура воздуха				
$\delta^{18}O$	<b>0,60</b>	<b>0,69</b>	<b>0,43</b>	<b>0,78</b>	<b>0,81</b>
$\delta D$	<b>0,60</b>	<b>0,70</b>	<b>0,27</b>	<b>0,75</b>	<b>0,81</b>
	Количество осадков				
$\delta^{18}O$	-0,07	<b>0,14</b>	<b>-0,18</b>	0,05	<b>0,15</b>
$\delta D$	-0,05	<b>0,17</b>	-0,04	0,05	<b>0,18</b>
	Относительная влажность воздуха				
$\delta^{18}O$	<b>0,31</b>	<b>-0,23</b>	<b>-0,48</b>	<b>-0,80</b>	<b>-0,37</b>
$\delta D$	<b>0,32</b>	<b>-0,24</b>	<b>-0,36</b>	<b>-0,60</b>	<b>-0,36</b>

Примечание: жирным шрифтом выделены статистически значимые коэффициенты корреляции при  $\alpha=0,05$ .

Согласно таблице 1, наиболее тесная связь вариаций значений  $\delta^{18}O$ ,  $\delta D$  наблюдается с температурой воздуха. Эта связь объясняется в первую очередь влиянием температуры на фракционирование изотопов при испарении воды с земной поверхности, включая поверхность почвы и водоёмы: чем выше температура, тем больше тяжелых изотопов поступает в атмосферу. Максимальный коэффициент корреляции ( $r=0,81$ ) соответствует всему периоду наблюдения и отражает общие черты в годовом ходе изотопных и температурных рядов: максимальные значения в летние периоды и минимальные в зимние. Связь между стабильными изотопами и приземной температурой воздуха не постоянна по сезонам года. Самая слабая корреляция по сравнению с остальными сезонами наблюдается в летний период (табл. 1), что можно объяснить дополнительным испарением изо-

точно более легкой воды с поверхности почвы и внутренних водоемов. Более легкий изотопный состав воды в почве и поверхностных водоемов, в свою очередь, объясняется тем, что значительная ее часть формируется за счет таяния снега, накопленного в зимний период, когда  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  значения в осадках минимальны.

Значимые коэффициенты корреляции между изотопным составом атмосферных осадков и относительной влажностью воздуха нельзя объяснить прямым влиянием последней на фракционирование изотопов. По-видимому, сказывается влияние общих факторов на фракционирование изотопов и на влажность воздуха в процессе влагообмена между земной поверхностью и атмосферой.

Корреляционная связь между  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  и количеством осадков слабая и неоднозначная. Значимые коэффициенты корреляции наблюдаются только в весенний и летний периоды. Большого влияния этого параметра на изотопный состав осадков в г. Томске не происходит.

Для определения влияния регионов-источников атмосферной влаги для осадков в г. Томске был выполнен анализ обратных траекторий с помощью модели HYSPLIT [5]. На основе этого анализа было выявлено, что во все сезоны года влага с наиболее тяжелыми изотопными составами кислорода и водорода поступает с территории Черноморско-Каспийского региона и Казахстана, влага с наиболее легкими – с территорий Северной части Атлантического океана и Северного Ледовитого океана.

Таким образом, были выявлены следующие особенности динамики изотопного состава кислорода и водорода в атмосферных осадках в г. Томске. Изменения объемной активности трития главным образом связаны с интенсивностью стратосферно-тропосферного обмена и типом атмосферных осадков, корреляционных связей с изменениями количества осадков, температурой и относительной влажностью воздуха не обнаружено. В динамика  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  значений атмосферных осадков связана с изменениями температуры воздуха в Томске и с регионами-источниками влаги для атмосферных осадков, выпадающих в городе. В  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  рядах присутствует колебание с периодом 365,2 дней, вклад которых в общую дисперсию каждого ряда составляет 50%. Годовой ход значений  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  в осадках совпадает с годовым ходом температуры воздуха.

Работа выполнена в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН (FWRG 2021 0001 регистрационный номер проекта 121031300154-1).

1. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. М.: Научный мир, 2009. 632 с.

2. Aggarwal P.K., Romatschke U., Araguas-Araguas L. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. // Nature Geoscience. 2016. V. 9. P. 624-629. doi:10.1038/ngeo2739.

3. Hocke K., Kampfer N. Gap filling and noise reduction of unevenly sampled data by means of the Lomb-Scargle periodogram // Atmos. Chem. Phys. 2009. №9. P. 4197–4206. doi: 10.5194/acp-9-4197-2009.

4. Маркелова А.Н., Калашникова Д.А., Симонова Г.В. Активность трития в атмосферных осадках г. Томска // Материалы Международной конференции и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIRROMIS-2022» (Томск, 12-17 сентября 2022). – Томск: Томский центр научно-технической информации, 2022. С. 160-162. doi: 10.5281/zenodo.7136746.

5. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan, F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2015. V. 96. P. 2059–2077.

## ДИНАМИКА СТОКА РЕКИ НИЖНЯЯ ТУНГУСКА ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ

*Мусохранова А.В., Михеева Н.А.*

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск, [nastya.krasn@mail.ru](mailto:nastya.krasn@mail.ru),  
[mikheevana@yandex.ru](mailto:mikheevana@yandex.ru)

Изучение динамики стока рек является важной задачей в соответствии с современными принципами рационального природопользования, социально-экологического значения и сохранения водных экосистем. Влияние климатических изменений на объемы и внутригодовое распределение стока рек подтверждается многочисленными исследованиями [1, 7, 12]. В настоящее время значительные территории северных регионов находятся под влиянием процессов активного нефтегазового и золотодобывающего промышленного освоения природных ресурсов. Изменение стока рек обусловлено и увеличением объемов хозяйственной деятельности в пределах водосбора [5, 6, 13].

Исследовали водосборный бассейн р. Нижняя Тунгуска на основе данных многолетних наблюдений за атмосферными осадками, температурой и стоком реки. Река Нижняя Тунгуска - правобережный приток Енисея, площадь бассейна реки составляет 473 тыс. км<sup>2</sup>, протяженность реки - 2989 км. Исток реки расположен на территории Лено-Ангарского водораздела на северном склоне Верхне-Тунгусской возвышенности. Большая часть водосбора расположена на Среднесибирском плоскогорье. Наиболее распространенными зональными почвами в районе являются мерзлотно-таежные, весь бассейн реки находится в районе вечной мерзлоты, имеющий сплошное и островное распространение [5, 8].

По лесорастительному районированию территория бассейна реки Нижняя Тунгуска в ее среднем и нижнем течении принадлежит Нижне-Тунгусскому лесорастительному округу северной тайги, где распространены лиственничные лишайниковые, кустарничково-лишайниковые, кустарничково-моховые типы леса [10]. В верхнем течении бассейна р. Нижней Тунгуски в границах равнинной Ербогачёнской провинции северная часть территории представлена северотаежными кустарничково-моховыми формациями. Далее с продвижением на юг распространены среднетаежные сосновые осоково-кустарничково-зеленомошные леса, лиственничники кустарничково-зеленомошные с примесью сосны и ели [4].

На территории бассейна Нижняя Тунгуска развиваются лесная, золотодобывающая и нефтегазовая промышленность, которые постепенно приводят к сокращению больших площадей лесов. Многочисленные технологические дороги и иные линейные объекты, сопровождающие промышленные работы, пересекают речные русла, изменяют водный режим реки и ее притоков. В настоящее время верхняя часть бассейна Нижней Тунгуски покрыта устойчиво длительно-производными и среднеустойчивыми типами ландшафтов. Основные виды ландшафтных нарушений: деградация и трансформация растительного покрова, изменение температурного режима многолетнемерзлых пород, приводит к обводнению и проседанию грунтов и, как следствие, к образованию многодорожья, активизации линейной эрозии [2, 3].

Для изучения динамики годового стока р. Нижняя Тунгуска были использованы данные среднемесячных расходов воды гидрологического поста Большой Порог и построены климатические тренды среднемесячной и среднегодовой температуры, средне-годовых атмосферных осадков по данным метеостанций Агата, Тура и Ванавара. Для анализа были использованы как фондовые материалы многолетних наблюдений за стоком на гидрологических постах (УГМС РФ), так и фактические данные открытых источ-

ников [9]. Длительность рядов наблюдений составляет 50 лет (1971 – 2021 год). Водосборный бассейн реки Нижняя Тунгуска был построен на основе цифровой модели рельефа (рисунок 1).

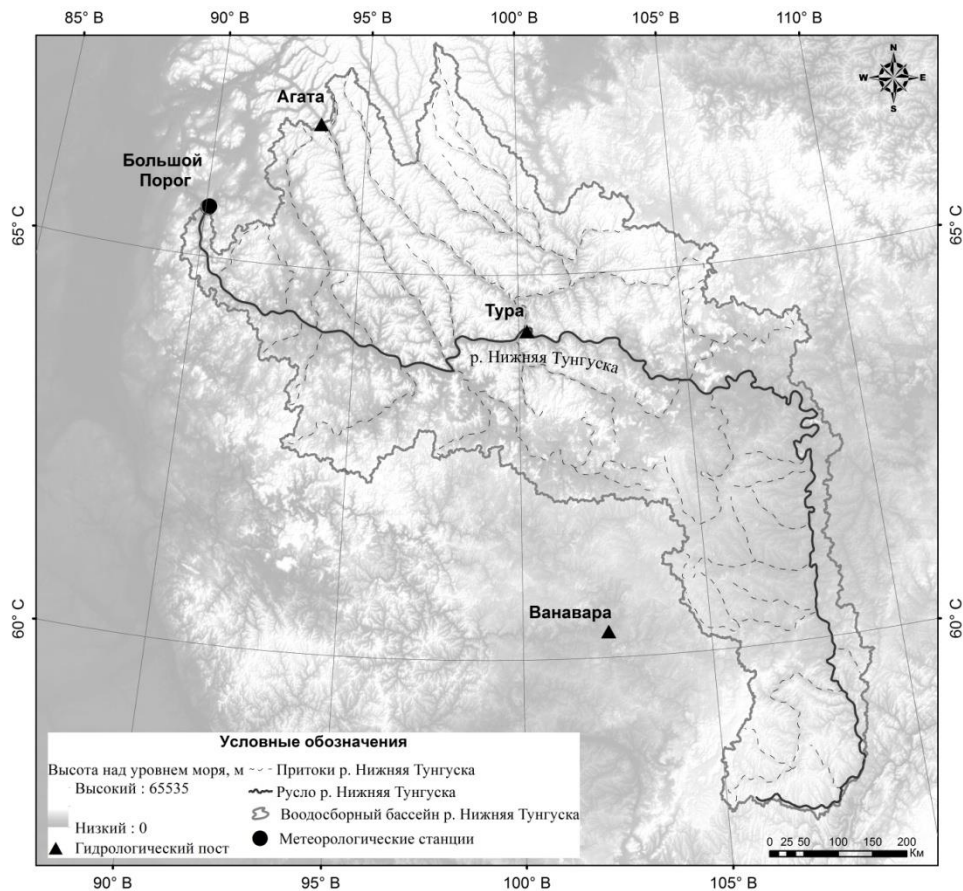


Рисунок 1. Бассейн реки Нижняя Тунгуска.

Климат изучаемого района резко континентальный. Зима холодная и продолжительная, по данным многолетних наблюдений на метеостанциях района исследования средняя температура зимних месяцев составляет  $-30,5^{\circ}\text{C}$ , лето прохладное и короткое, средняя температура летних месяцев  $11,0^{\circ}\text{C}$ , суммарное годовое количество осадков 409,5 мм. Климатические условия района исследований благоприятствуют развитию процессов болотообразования [5].

В многолетней динамике (1971 – 2021 гг.) исследуемого региона наблюдается достоверное повышение среднегодовых значений температур воздуха ( $0,5^{\circ}\text{C}/10$  лет). Статистически значимые коэффициенты парной корреляции изменения среднегодовой температуры воздуха на метеостанциях составили 0,85 (Агата – Тура), 0,75 (Агата-Ванавара), 0,94 (Тура – Ванавара), говорит о равномерности распределения данного показателя в районе исследований, несмотря на особенности рельефа территории.

В отношении атмосферных осадков достоверных значений корреляции на метеостанциях в районе исследования не выявлено. В структуре данных среднегодового количества атмосферных осадков четких тенденций к увеличению на репрезентативных метеостанциях не обнаружено, за исключением метеостанции Агата, где увеличение тренда составила 0,5 мм/10 лет (рисунок 2г.), что может быть связано с расположением метеостанции на склоне плато Путорана на высоте 286 м над уровнем моря.

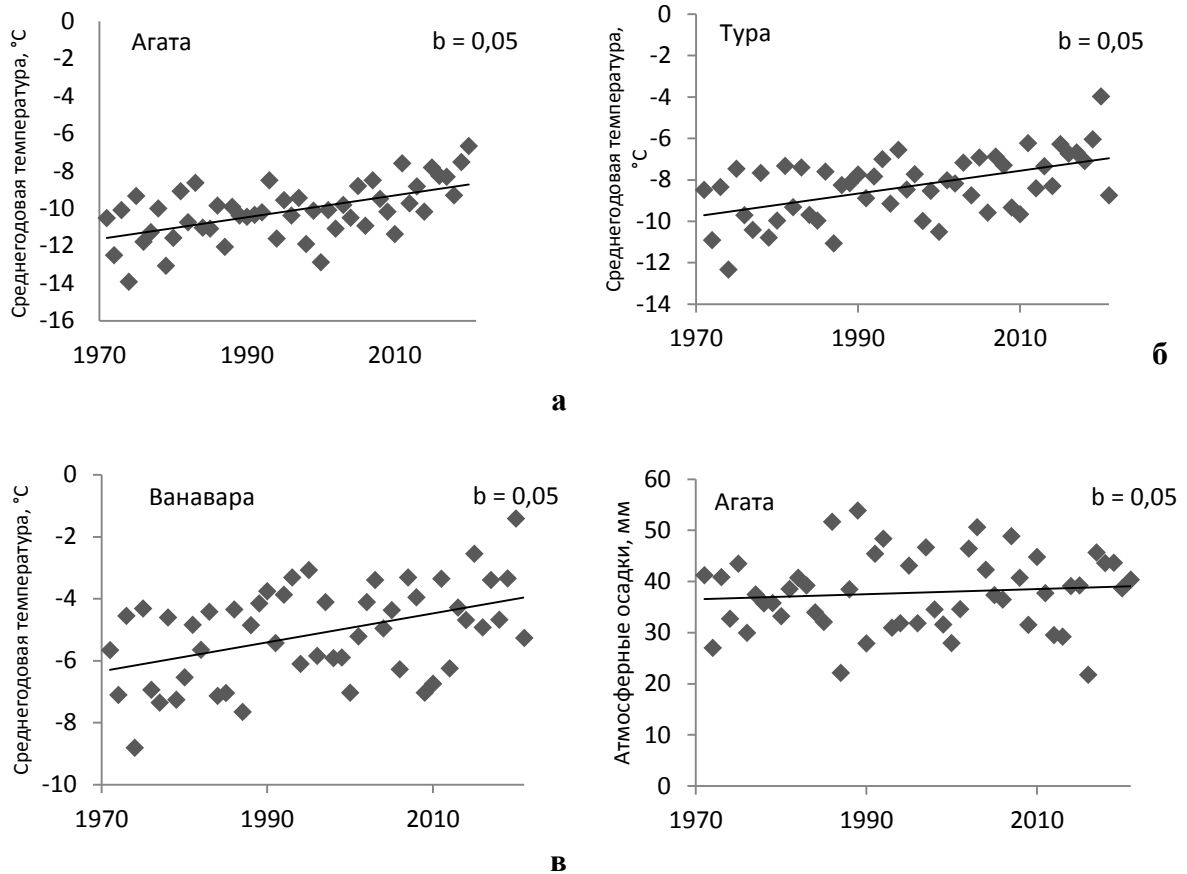


Рисунок 2. Динамика среднегодовой температуры (а, б, в) среднегодового количества атмосферных осадков (г) а период 1971-2021 гг. на метеостанциях.

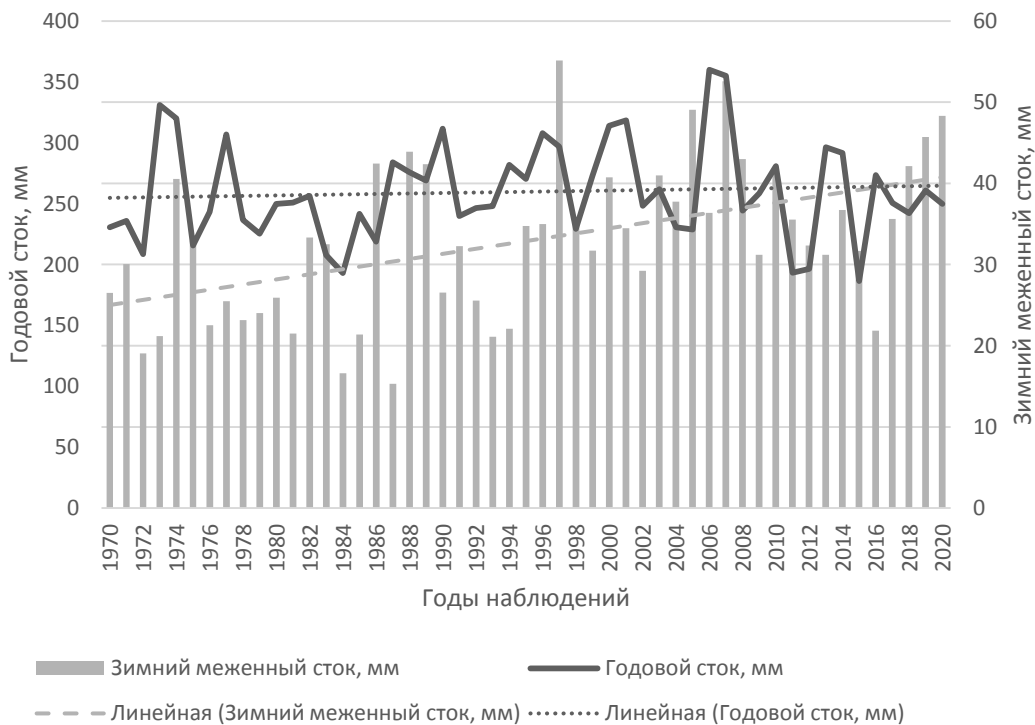


Рисунок 3. Динамика годового стока р. Нижняя Тунгуска за период 1971-2021 гг.

В динамике среднегодового стока можно отметить рост на 20 мм за 10 лет, зимний меженный сток характеризуется увеличением значений линейного тренда на 31 мм за 10 лет (рисунок 3). Основными природными факторами, определяющими гидрологические особенности Нижней Тунгуски, является ее большая водность и неравномерность распределения стока внутри года. Процесс взаимосвязи между выпавшими осадками и стоком рек усложняется неравномерностью выпадения осадков и их трансформацией при прохождении через систему водосбора, накоплением и последующим таянием твердых осадков, испарением и др. Наблюдаемая тенденция увеличения температуры и стока в районе исследования, без значимого увеличения осадков может говорить о таяния вечной мерзлоты как в результате климатических изменений, так и в результате хозяйственной деятельности человека.

1. Акименко Т.А. Климатические изменения водности рек центра Русской равнины в конце XX века // Современные глобальные изменения природной среды. – 2005. Т. 1. – С. 382–389.
2. Биличенко И.Н., Красноштанова Н.Е. Влияние природно-антропогенных трансформаций таежных ландшафтов на социально-экологические системы верховьев рек Нижняя Тунгуска и Лена // XIV международная ландшафтная конференция, VII Мильковские чтения. – 2023, С. 185-186.
3. Биличенко И.Н., Макаров С.А., Опекунова М.Ю., Власова Н.В. Эколого-географические исследования на Ярактинском нефте-газоконденсатном месторождении (Иркутская область) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – Москва, 2017. – № 2. С. 33-37.
4. Власова Н.В. Ландшафтно-геохимическое состояние таежных геосистем в бассейне Нижней Тунгуски // География и природные ресурсы. 2011. № 2. С. 100-107.
5. Корпачев В. П., Пережилин А. И., Андрияс А. А., Рябоконт Ю. И. Загрязнение и засорение водохранилищ ГЭС древесно-кустарниковой растительностью, органическими веществами и влияние их на качество воды: М.: 2010 г. Монография. ISBN: 978-5-91327-101-3, (электронный ресурс) <https://monographies.ru/en/book/view?id=85>.
6. Кумани М. В., Шульгина Д. В., Киселев В. В. Многолетняя динамика основных элементов стока рек в пределах Центрального Черноземья // Региональные геосистемы. – 2021. – Т. 45, № 4. – С. 617-631.
7. Максимова Н.Б., Гончаров С.П., Динамика объемов речного стока на примере отдельных рек Алтайского края // Вестник современной науки, № 9, 2015, С. 116-119.
8. Непряхин Е.М., Атаманов А.А., Константинов В.Д. Основные свойства мерзлотных дерново-таежных почв бассейна среднего течения реки Нижней Тунгуски // Вопросы географии Сибири, сборник статей, 1974 Томск, С. 125-132
9. Специализированные массивы данных для климатических исследований. – [Электронный ресурс]. – <http://meteo.ru/it/178-aisori> (дата обращения 21.03.2022).
10. Стаканов В.Д. Характеристика лесного покрова // Лесные экосистемы Енисейского меридиана. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2002. – С. 19 -24.
11. Харук В.И., Двинская М.Л., Рэнсон К. Дж. Пространственно-временная динамика пожаров в лиственных лесах северной тайги Средней Сибири // Экология, 2005, № 5, С. 1- 10.
12. Шикломанов И.А. Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата // Тезисы докладов «6 Всероссийского гидрологического съезда, СанктПетербург, 28 сентября – 1 октября 2004 г.». 2004. – С. 200–2003.
13. Burenina T.A., Onuchin A.A. . Spatial-temporal aspects of the hydrological regime in catchments after clearcutting // American Scientific Journal. – 2021. – No. 48-1(48). – P. 24-36.



## СКОРОСТЬ РАЗЛОЖЕНИЯ РАСТЕНИЙ-ТОРФООБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖАХ ОЛИГОТРОФНЫХ БОЛОТ ПОДВЕРЖЕННЫХ ПИРОГЕННОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ НА НАЧАЛЬНЫХ ЭТАПАХ ДЕСТРУКЦИИ

Никонова Л.Г., Головацкая Е.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
lili112358@mail.ru

Болотные экосистемы в естественном состоянии способны накапливать углерод в виде торфа, что делает их ключевыми экосистемами с точки зрения сохранения углеродного баланса. Однако, современные климатические изменения, антропогенное воздействие, пожары могут привести к ускорению процесса разложения органического вещества, что вызовет увеличение потока CO<sub>2</sub> в атмосферу и как следствие может привести к уменьшению запасов торфа [1-3]. Цель данной работы заключалась в оценке скорости разложения органического вещества растений-торфообразователей в условиях торфяных залежей ненарушенных и пирогенных торфяников на начальных этапах деструкции.

Исследования проводили на болотных фитоценозах, расположенных на северо-восточных отрогах Васюганского болота (Бакcharский район Томской области): ненарушенный сосново-кустарничково-сфагновый фитоценоз – Естественный рям, сосново-березово-пушицево-сфагновый фитоценоз с явно выраженными следами пирогенного воздействия «Гарь».

Исследовали скорость разложения растительного опада основных растений-торфообразователей, типичных для олиготрофных болот: листья кустарничка *Chamaedaphne calyculata* Moench. и очес мха *Sphagnum fuscum* Klinggr. Кроме отдельных видов, исследовали скорость разложения смешанного образца, представляющего собой смесь *S. fuscum* и *Ch. calyculata* в соответствии с долей каждого вида в растительном опаде 60% и 40% соответственно.

Для определения скорости разложения применялся метод закладки растительных остатков в торф [4]. В лабораторных условиях растения высушивали до воздушно-сухого веса и раскладывали в мешочки из синтетического материала по 15 г. Приготовленный растительный материал закладывали в торфяную залежь в мае, на глубину 10 см от поверхности в трехкратной повторности. Образцы с растительным материалом извлекали через 1 и 4 месяца после начала эксперимента. В образцах определяли убыль массы растительного вещества весовым методом. В исходных образцах растительного вещества и в образцах после эксперимента с целью получения количественных характеристик потерь макроэлементов была определена зольность методом сухого озоления [5].

Исследуемые растения значительно отличаются друг от друга по химическому составу (табл. 1) – самым высоким содержанием углерода, азота, зольных элементов и наименьшим соотношением C/N характеризуются листья *Ch. calyculata*. Менее благоприятным для деятельности микроорганизмов химическим составом обладает *S. fuscum*: наименьшим содержанием углерода и азота, высоким соотношением C/N и низким показателем зольности. Смешанный образец по химическому составу занимает промежуточное положение между его отдельными компонентами, но обладает достаточно высоким соотношением C/N, что также может замедлять активность микроорганизмов-деструкторов.

**Таблица 1. Исходный химический состав растений-торфообразователей**

Растение \ Содержание	Зольность, %	C, %	N, %	C/N
<i>Chamaedaphne calyculata</i>	2,49	53,33±0,1	1,92±0,3	28
<i>Sphagnum fuscum</i>	1,77	45,13±0,1	0,69±0,3	65
Смешанный образец	1,89	51,53±0,1	1,01±0,3	51

Выбранные точки исследования обладают рядом уникальных характеристик, которые могут оказать значительное влияние на процесс трансформации органического вещества. Естественный рям расположен вне зоны воздействия антропогенных факторов и может считаться ненарушенным, имеет более мощную торфяную (320 см), в то время как для «Гари» она составляет от 70 до 90 см. В результате крупного пожара (1998 г.) данный участок был сильно поврежден, в настоящее время встречаются явные следы пожара, такие как поваленные деревья, обгорелая кора уцелевших деревьев. Результаты предыдущего исследования [6] показали, что температура торфяной залежи в исследуемых фитоценозах отличается. Условия на Естественном ряме оказались более прохладными, по сравнению с «Гарью» (на 1,5 и 1,7°C в мае и июне, соответственно). Также, в работах [7, 8] отмечалось, что участок «Гарь» является наиболее обводненным в период вегетации, чем Естественный рям.

На первых этапах разложения происходит наиболее интенсивное выделение углерода. Это связано с тем, что на начальных стадиях разложения активно действуют микроорганизмы, которые расщепляют органические вещества и выделяют углерод в форме диоксида углерода. Со временем, количество микроорганизмов уменьшается, что приводит к замедлению процесса разложения и снижению скорости выделения углерода [9]. В среднем за первый месяц разложения происходит 56,5% и 69,1% от общих потерь органического вещества за 4 месяца в образцах, заложенных в Естественном ряме и «Гари» соответственно. За первый месяц потери массы в условиях Естественного ряма колеблются от 4,4 до 13,3%, в условиях «Гари» от 2,6 до 21,7% (рисунок 1).

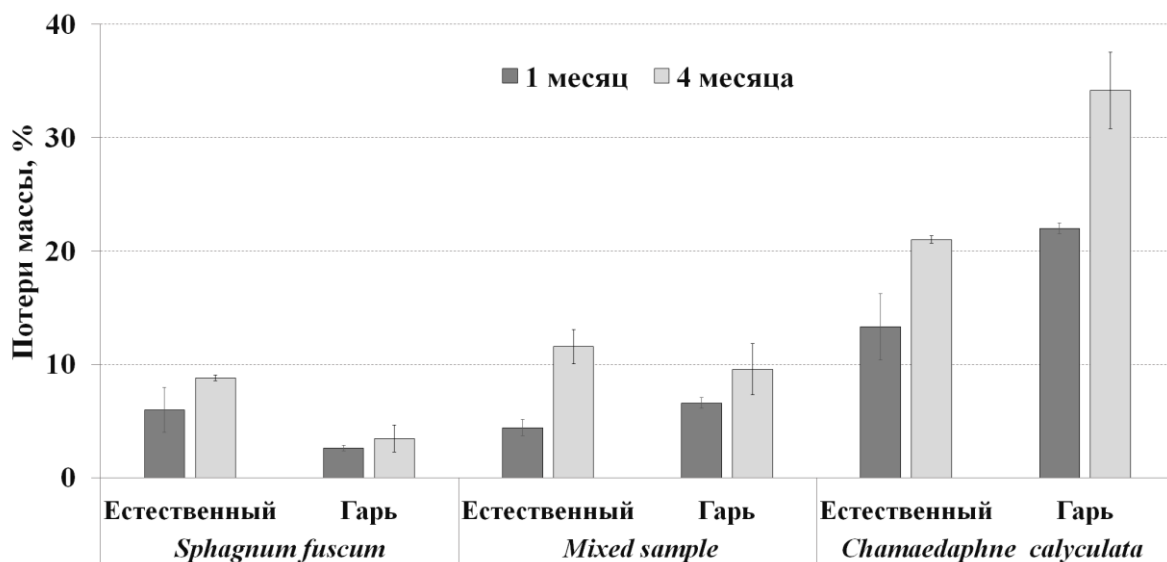


Рисунок 1. Потери массы опада растений-торфообразователей в торфяной залежи Естественного ряма (Естественный) и Горелого ряма (Гарь) на начальных этапах деструкции, % от исходной массы.

Гидротермические условия «Гари» в основном оказывают положительное влияние на процесс разложения, так для *Ch. calyculata* потери массы за 4 месяца на 13,2% выше, чем в Естественном ряме. Однако разложение *S. fuscum* наиболее активно протекает в условиях Естественного ряма, потери массы здесь на 5,3% выше, чем в «Гари».

Среди исследуемых образцов наибольшая скорость разложения на начальных этапах, как и предполагалось исходя из химического состава растительного опада, выявлена *Ch. calyculata* (21,0% и 34,2% в Естественном ряме и «Гари», соответственно). Гораздо медленнее процесс разложения протекает в образцах *S. fuscum* (3,57% и 8,8% в условиях «Гари» и Естественного ряма, соответственно). Разложение Смешанного образца вызывает особый интерес, за период эксперимента (4 месяца) как в условиях «Гари», так и в условиях Естественного ряма образец занимает промежуточное положение между *S. fuscum* и *Ch. calyculata* (потери массы составили 9,6% и 11,6% в «Гари» и Естественном ряме соответственно)).

Важное влияние на динамику и скорость разложения оказывает также зольность. В естественных условиях происходит снижение зольности в Смешанном образце и в образце *Ch. calyculata* (рисунок 3), в то время как для *S. fuscum* наблюдается накопление зольных элементов. В условиях «Гари» происходит достоверное снижение зольности в Смешанном образце, и увеличение (на 22 %) в образце *S. fuscum*. В то же время для *Ch. calyculata* различие зольности в условиях «Гари» незначимы.

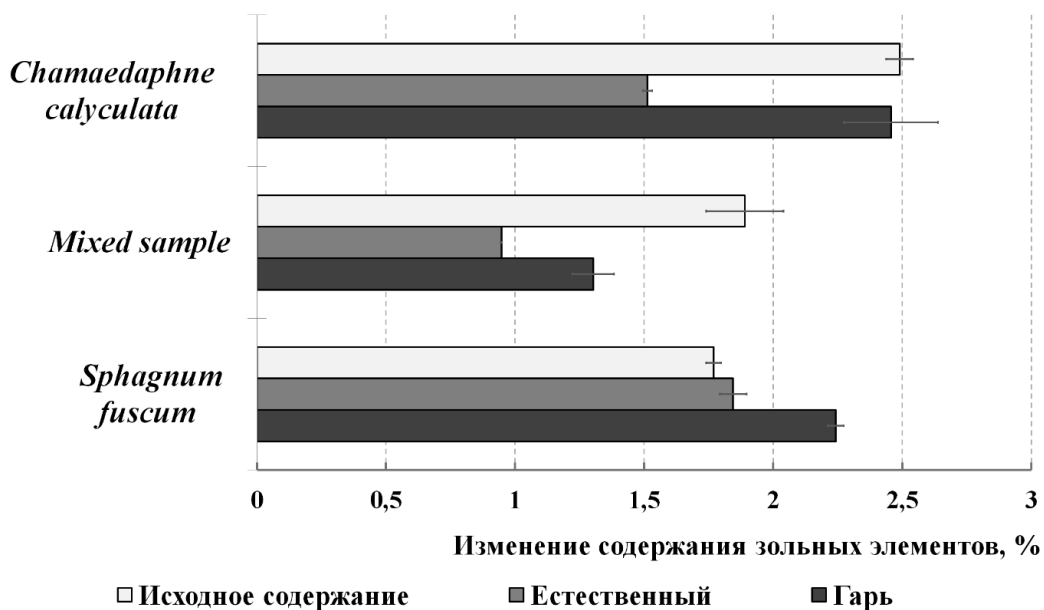


Рисунок 2. Изменение содержания зольных элементов в растительных остатках при разложении в торфяной залежи Естественного ряма (Естественный) и Горелого ряма («Гарь») за 1 и 4 месяца.

Исследование показало, что в естественных условиях потери массы за первый месяц деструкции составляют от 4,4% до 13,3%, а в постпирогенных условиях – от 2,6% до 21,7%. За первый месяц разложения происходят наибольшие потери органического вещества растительных остатков (в среднем 56,6% и 69,1% от общих потерь за вегетационный период в Естественном ряме и «Гари» соответственно). Наиболее активное разложение происходит в образцах *Ch. calyculata* в условиях «Гари», а в образцах *S. fuscum* и в Смешанном образце – в Естественном ряме. Таким образом, смешивание компонентов оказывает влияние на скорость разложения. В Смешанном образце и *Ch. calyculata* происходит вынос зольных элементов на начальных этапах деструкции, для *S. fuscum*

характерно накопление зольных элементов, особенно в условиях «Гари». Исследование особенностей процесса трансформации растительного опада растений-торфообразователей на начальных этапах разложения позволит получить более полное представление о роли болотной растительности в процессе торфообразования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научной темы: «Развитие системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых газов болотных и лесных экосистем Западной Сибири», Рег. № 122111400002-2.

1. Turetsky M.R., Benscoter B., Page S., Rein G., Van Der Werf G.R., Watts A. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss // *Nature Geoscience*. 2015. Vol. 8. №. 1. P. 11-14.

2. Hogg E.H., Lieffers V.J., Wein R.W. Potential Carbon losses from peat profiles: effects of temperature, drought cycles, and fir // *Ecological Applications*. 1992. Vol. 2. № 3. P. 298-306.

3. Sommers W.T., Loehman R.A., Hardy C.C. Wildland fire emissions, carbon, and climate: Science overview and knowledge needs // *Forest Ecology and Management*. 2014. № 317. P. 1-8.

4. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука ЛО, 1978. 172 с.

5. Дурынина Е.П., Егоров В.С. Агрехимический анализ почв, растений, удобрений. М.: МГУ, 1998. 113 с.

6. Никонова Л. Г., Головацкая Е.А., Курьина И.В., Курганова И.Н. Скорость разложения растений-торфообразователей в олиготрофных болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири: оценка влияния уровня болотных вод и температуры торфяной залежи // *Почвоведение*. 2019. № 9. С. 1092-1103.

7. Никонова Л.Г., Головацкая Е.А. Оценка скорости разложения растений-торфообразователей в осушенных и пирогенных торфяниках // *Enviromis* 2020. 2020. С. 227-230.

8. Golovatskaya E., Nikonova L., Simonova G., Kalashnikova D. Variability of the carbon isotope composition of peat-forming plants during the biochemical transformation // *Water*. 2022. № 14. 4035 <https://doi.org/10.3390/w14244035>.

9. Billett M.F. Linking land- atmosphere- stream carbon fluxes in a lowland peatland system // *Global Biogeochemical Cycles* 2004. Vol.18. № 1. GB1024.

## **ЗАВИСИМОСТЬ НАДЗЕМНОЙ ФИТОМАССЫ ОТ ВЫСОТЫ И ПРОЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ ТРАВЯНО-МОХОВО- КУСТАРНИЧКОВОГО ЯРУСА В ТИПИЧНЫХ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ «МУХРИНО»**

*Ниязова А.В., Ильясов Д.В., Клименко В.С., Коваль А.А., Новикова Т.А., Русакова В.А.*  
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, [ugrasu@ugrasu.ru](mailto:ugrasu@ugrasu.ru)

Болотные экосистемы в ненарушенном состоянии играют важнейшую роль в круговороте углерода, являясь естественным поглотителем CO<sub>2</sub> и крупнейшим резервуаром углерода [5]. Основным механизмом запасаания углерода в болотных экосистемах является ассимиляция атмосферного CO<sub>2</sub> в процессе фотосинтеза зеленых растений и последующее накопление углерода в виде торфяной залежи.

Надземная фитомасса является физиономическим индикатором структуры, функционирования и продуктивности экосистемы [6]. Величина накопления и потерь органического вещества конкретной экосистемой может отражать изменения внешних условий, к примеру: изменение гидрологического режима, климатических особенностей, а также влияние антропогенной деятельности [1].

Оценить запасы фитомассы на всей площади болотного массива на сегодняшний день до сих пор остается не простой задачей по нескольким причинам: труднодоступность и в некоторых случаях непроходимость территорий, большое разнообразие болотных биотопов, характеризующихся различной скоростью накопления продукции и разложения органического вещества [3].

Существует комплекс методов, используемых для оценки запасов фитомассы в масштабах отдельного болотного массива: полевой – основан на отборе растительного вещества методом укосов и прямым измерением массы; дистанционный спектральный – оценка запасов фитомассы на основе нормализованного относительного вегетационного индекса (NDVI), верифицированного при помощи полевого метода; дистанционный лидарный – оценка запасов фитомассы на основе измерения морфологических характеристик растительного покрова, также верифицированного при помощи полевого метода [4].

К сожалению, все рассмотренные выше методы, примененные по отдельности, с очень малой вероятностью позволят получить достаточно хороший результат в масштабах отдельного болотного массива. Например, полевой метод является наиболее точным, однако крайне трудоемок, что ограничивает масштаб его применения, что осложняется крайне высокой гетерогенностью болотных экосистем. Дистанционный спектральный метод часто ограничен пространственным и временным разрешением снимков, их спектральными характеристиками, а также вертикальной структурой растительных сообществ (ярусность сообществ затрудняет их видимость при съемке, поэтому спектральные характеристики растений коррелируют с фитомассой лишь до определенного предела). Кроме того, совершенно разные биотопы часто имеют близкие спектральные характеристики, что ограничивает адекватное использование данного метода оценкой изменчивости лишь «внутри» одного из них. При этом точность определения запасов сильно будет зависеть от однородности экосистемы [2]. Лидарный метод имеет преимущество в наиболее детальной, на уровне биотопа и в некоторых случаях на уровне нанотопа, оценке запасов фитомассы. Однако, как и любой другой дистанционный метод, требует наземной верификации.

Мы предполагаем, что для полноценной оценки запасов фитомассы в болотных экосистемах с учетом их высокой пространственно-временной гетерогенности необхо-

димо использовать комплексный подход, основанный на: i) предварительном дистанционном зондировании местности и отборе полевых образцов фитомассы на наиболее «типичных» с точки зрения спектральных и морфологических характеристик растительного покрова участков ii) поиска формализованной зависимости между спектральными, морфологическими и полевыми (прямое измерение фитомассы, высоты и проективного покрытия) характеристиками растительного покрова iii) пространственной интерпретации полученных данных

Текущее исследование посвящено описанию результатов предварительного этапа разработки комплексной методики оценки запасов фитомассы растительного покрова на примере олиготрофного болотного массива Мухрино. Его цель заключалась в поиске связи между морфологическими характеристиками травяно-кустарничкового яруса растительного покрова (высота, проективное покрытие) и запасами фитомассы.

Объектами исследования были выбраны типичные для Средней тайги западной Сибири болотные биотопы.

1. «Открытое болото» – сфагновое болото с редкими низкими соснами с *Pinus sylvestris*, *Chamaedaphne calyculata*, *Eriophorum vaginatum*, *Sphagnum angustifolium* и *S. divinum*.

2. Рослый рям – облесенное сосново-кустарничково-сфагновое болото характеризуется хорошо выраженным древесным ярусом из сосны *Pinus sylvestris* (высотой 6–10 м), с густым кустарничковым ярусом из *Ledum palustris*, *Chamaedaphne calyculata*, *Vaccinium myrtillus*, с преобладанием в напочвенном покрове *Sphagnum angustifolium* и *S. Divinum*.

3. Грядово-мочажинный комплекс – наиболее распространенный комплекс болот олиготрофного типа в Западной Сибири.

3а. «Гряда»: Сфагновые гряды с *Pinus sylvestris*, *Ledum palustris*, *Chamaedaphne calyculata* и *Sphagnum fuscum*. Высота сосен обычно составляет 0.5-2.0 м при покрытии 3–10%.

3б. «Мочажина Ш.»: мочажины, занятые *Scheuchzeria palustris*, моховой покров представлен *S. papillosum*, *S. jensenii*, *S. majus* и *S. lindbergii*

3с. «Мочажина Е.»: мочажины, занятые *Eriophorum vaginatum*, в моховом ярусе доминирует *Sphagnum balticum*.

4. «Рям»: типичный рям с *Pinus sylvestris* (0.5–4 м высотой), *Ledum palustris*, *Chamaedaphne calyculata* и *Sphagnum fuscum*, омбротрофными карликовыми кустарниками и сфагновыми кочками, поросшими соснами.

Отбор образцов фитомассы травяно-кустарничкового яруса выполнялся в период различной вегетационной активности в конце мая июня, июля, в двукратной пространственной повторности (на разных формах микрорельефа – в повышениях и понижениях) в каждом биотопе на площадках 40×40 см методом укосов. На исследуемых участках проводили геоботанические описания травяно-кустарничкового и мохового ярусов, с измерением высот растений (в пятикратной повторности на каждой площадке), определением проективного покрытия, фенофазы и жизненности для каждого представленного вида. Затем надземную фитомассу, разделенную по видам, высушивали при температуре 75°C, до постоянного сухого веса и пересчитывали массу сухого вещества на м<sup>2</sup>.

Мы предположили, что надземная сухая фитомасса будет коррелировать с «объемом растений» представленных на площадке 40×40 см, а именно: суммой произведений средней высоты растений (по видам) на среднее проективное покрытие (также по видам). Линейная регрессионная зависимость между «объемом растений» и запасами фитомассы (коэффициент детерминации составил 0.91 при  $p=0.1$   $F=1.14$ ) подтвердила это предположение, что позволяет говорить о достоверной и статистически значимой связи (рис. 1).

К сожалению, нам не удалось найти достоверные закономерности изменения запасов фитомассы травяно-кустарничкового яруса по представленным биотопам. Мы предполагаем, что учет разнообразия характеристик древесного яруса растительного покрова и увеличение количества отобранных образцов в дальнейшем позволит решить эту задачу.

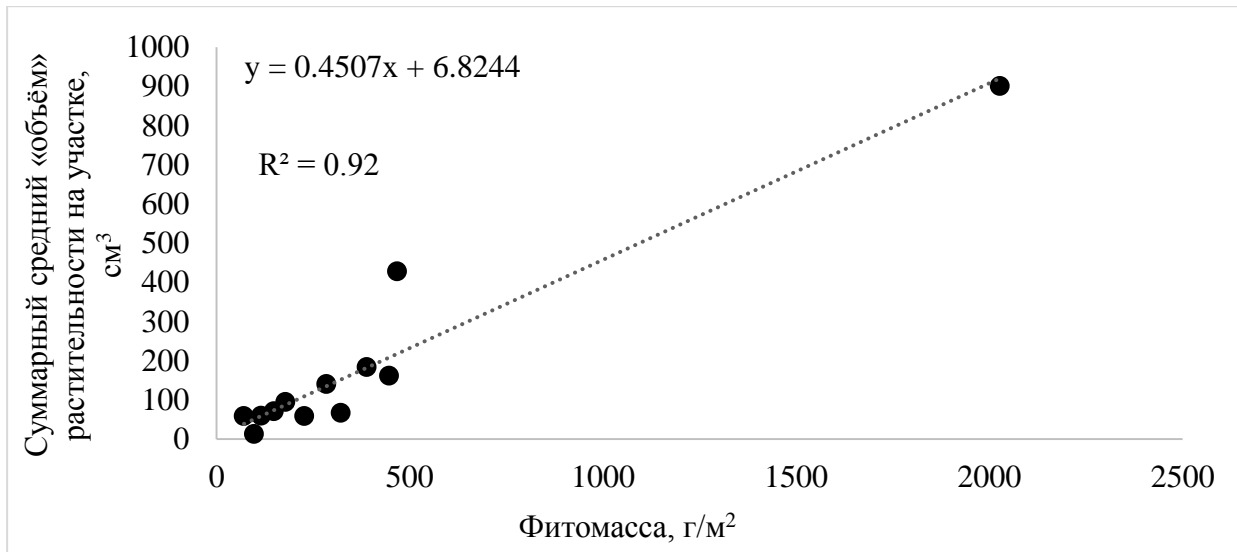


Рисунок 1. Линейная регрессионная зависимость между Суммарным средним «объём» растительности на участке и запасом фитомассы.

Тем не менее, полученные результаты будут использованы в дальнейшем для развития методики интерполяции запасов фитомассы на основе комплексного подхода в масштабе всего болотного массива, поскольку лидарное сканирование по своей сути предполагает прямое измерение высоты растительного покрова, а мультиспектральные данные позволяют оценить проективное покрытие представленных видов растений. Однако дискуссионным остается вопрос об учете влияния ярусности растительного покрова на дистанционные измерения высоты растений и проективного покрытия.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по организации молодежной лаборатории в Югорском государственном университете (НИР 1022031100003-5-1.5.1) в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты».

1. Вомперский С. Э. О методологии оценок современной нетто-экосистемной продукции (NEP) болота //Торфяники Западной Сибири и цикл. – 2007.

2. Дюкарев Е. А., Алексеева М. Н., Головацкая Е. А. Исследование растительного покрова болотных экосистем по спутниковым данным //Исследование Земли из космоса. – 2017. – №. 2. – С. 38-51.

3. Косых Н. П. и др. Надземная и подземная фитомасса и чистая первичная продукция в бореальных болотных экосистемах Западной Сибири // Экология водно-болотных угодий и управление ими. – 2008. – Т. 16. – С. 139-153.

4. Glenn N. F. et al. Errors in LiDAR-derived shrub height and crown area on sloped terrain //Journal of Arid Environments. – 2011. – Т. 75. – №. 4. – С. 377-382.

5. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: Chapter 5: Demand, Services and Social Aspects of Mitigation. In Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: [P.R. Shukla, J. Skea, R.

Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, eds]. Cambridge University Press. 503 pp.. <https://doi.org/doi: 10.1017/9781009157926.007>.

6. Li A. et al. Lidar aboveground vegetation biomass estimates in shrublands: Prediction, uncertainties and application to coarser scales //Remote Sensing. – 2017. – Т. 9. – №. 9. – С. 903.



## ДИНАМИКА СВОЙСТВ ПОЧВ АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЮЖНОЙ КАРЕЛИИ

*Придача В.Б.<sup>1</sup>, Семин Д.Е.<sup>1</sup>, Екимов Д.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт леса КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, semind@krc.karelia.ru

<sup>2</sup>ФИЦ «Карельский научный центр РАН», г. Петрозаводск, edmitr2007@mail.ru

Лесные почвы, являясь крупнейшим хранилищем углерода, играют важную роль в поддержании экосистемных услуг, сохранении биоразнообразия, смягчении последствий глобального изменения климата (IPCC, 2013). Интенсивность депонирования углерода и, напротив, эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почв являются важнейшими показателями углеродного баланса наземных экосистем. Стабильность углеродного баланса почв определяется климатическими факторами и характером землепользования (Luo, Zhou, 2010). Проведение рубок леса приводит к существенному изменению лесного покрова и лесных почв, микроклиматических условий и водного режима почв, вследствие чего происходит интенсивная потеря углерода из лесных экосистем. Доминирование потерь углерода на дыхание над продуктивностью может изменить функциональную роль наземной экосистемы и превратить ее из стока в источник атмосферного углерода (Faticchi et al., 2019). Целью нашего исследования была оценка динамики почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> на сплошной вырубке сосняка черничного и под его пологом в течение трех вегетационных периодов в условиях среднетаежной подзоны Карелии.

Работа выполнена в среднетаежной подзоне Европейского Севера на территории Кондопожского района (Республика Карелия) в июле–августе в период с 2017 по 2019 гг. Сплошная рубка древостоя проведена летом 2009 г. на площади 12 га механизированным способом. Объектом исследования послужили подзолистые песчаные почвы (Albic Podzol (Arenic)) на сплошной вырубке сосняка черничного и для контроля – в естественной среде 95-летнего сосняка черничного (Рисунок 1). Экспериментальные участки на вырубке и в зрелом древостое подобраны с учетом однородности рельефа, почвообразующих пород, гидрологического режима почв.

Исследование эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почвы на сплошной вырубке и в сосняке черничном проводили в дневной динамике с 12 до 16 ч. в последнюю декаду июля – первую декаду августа в период с 2017 по 2019 гг. в ясные дни без осадков. Измерения дыхания почвы выполняли методом закрытых непрозрачных камер с помощью портативного инфракрасного газоанализатора LI-8100A (LI-Cor Inc., США). Для проведения измерений на каждом экспериментальном участке, не удаляя напочвенный покров, устанавливали кольца из поливинилхлорида диаметром 20 см и высотой 12 см на глубину 6 см. Почвенную эмиссию на пасечных участках и волоках сплошной вырубки исследовали с учетом трех микрогруппировок напочвенного покрова (травянистая – ПП 1<sub>1</sub>, зеленомошная – ПП 1<sub>2</sub>, мелкие порубочные остатки – ПП 1<sub>3</sub>). На всех участках кольца устанавливали в межкрупной зоне деревьев между растениями травяно-кустарничкового яруса на расстоянии 2–3 м. Измерения величины потока CO<sub>2</sub> с поверхности почв проводили в течение 90 секунд с интервалом в 30 секунд между измерениями согласно штатной конфигурации прибора (LI-8100A, 2012) в 3-кратной повторности для каждого кольца с подекадной периодичностью. Температуру почвы и объемную влажность почвы в корнеобитаемом слое (0–20 см) регистрировали с помощью датчиков температуры почвы (Omega, США) и объемной влажности почвы ECH<sub>2</sub>O EC-5 (Decagon Devices, Inc., США) возле каждого кольца в момент измерения эмиссии CO<sub>2</sub>.

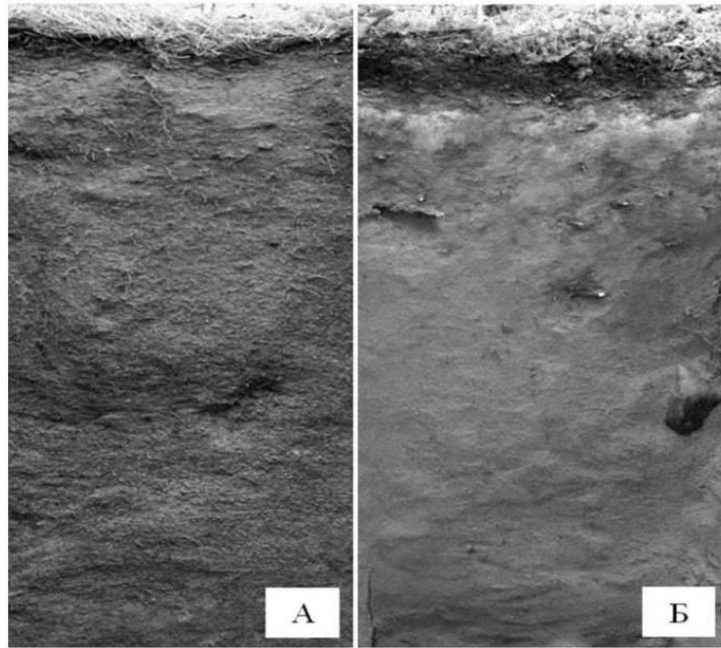


Рисунок 1. Профиль почв на сплошной вырубке (А) и в сосняке черничном (Б).

Ранее нами уже были отмечены высокая кислотность и бедность элементами минерального питания почв как сплошной вырубке, так и ненарушенного сосняка черничного (Pridacha et al., 2021). Высокая величина отношения C/N в органогенном горизонте почв вырубке (65) и сосняка (44) также характеризует напряженный режим азотного питания обоих фитоценозов и невысокую в целом скорость минерализации органического вещества.

Сравнительный анализ полученных данных в ходе полевых исследований дыхания почвы на разных экспериментальных участках показал на 30% более высокие значения эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почвы в сосняке черничном по сравнению с таковыми на сплошной вырубке (4.27–4.76 мкмоль/м<sup>2</sup> с). Более высокий уровень почвенного дыхания в естественном насаждении, очевидно, можно объяснить как вкладом лесной подстилки, так и бóльшим вкладом автотрофного дыхания вследствие большей биомассы корней взрослых деревьев и их равномерного распределения в минеральных горизонтах (Pridacha et al., 2021), а также гидротермическими условиями, в частности большей влажностью и меньшей температурой почвы по сравнению с вырубкой. Представляется вероятным и бóльший вклад гетеротрофного дыхания в общую эмиссию CO<sub>2</sub> с поверхности почв сосняка черничного относительно вырубке вследствие более высокого ризомикробного дыхания (Luo, Zhou, 2010). Вместе с тем, величина потока CO<sub>2</sub> с поверхности почв ненарушенного древостоя за 3-летний период наблюдений отличалась несколько меньшей изменчивостью (CV=18%) относительно почв сплошной вырубке (CV=23%). Этот факт хорошо согласуется с нашими данными о бóльшей однородности живого напочвенного покрова сосняка черничного относительно такового на вырубке (Pridacha et al., 2021). При этом, несмотря на неоднородность напочвенного покрова вырубке, спустя 10 лет после проведения сплошной рубки отмечено сходство ( $p > 0.05$ ) величины эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности почв разных микросайтов вырубке (травянистая ПП 1<sub>1</sub>, зеленомошная ПП 1<sub>2</sub>, мелкие порубочные остатки ПП 1<sub>3</sub>).

Также важно отметить, что, несмотря на высокую пестроту и мозаичность почвенного покрова, а также неоднородность дыхания почв (Luo, Zhou, 2010), полученные величины почвенной эмиссии CO<sub>2</sub> на сплошной вырубке и в спелом сосняке черничном в

условиях Южной Карелии были хорошо сопоставимы с величинами дыхания почв, отмеченных для средневозрастных сосновых древостоев Финляндии (Niinistö et al., 2011) и Средней Сибири (Mahnykina et al., 2020). Этот факт дает нам основание считать полученные величины потока CO<sub>2</sub> с поверхности почв сплошной вырубке сосняка черничного и естественного древостоя референсными для теплого периода года в данных биогеоценологических условиях. Полученные результаты являются основой для получения прогнозных оценок антропогенного влияния на показатели углеродного обмена почвенного покрова лесных экосистем в различных пространственных и временных масштабах.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

1. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. – Cambridge University Press, Cambridge. – 1535 p.

2. Fatichi S., Pappas C., Zscheischler J., Leuzinger S. Modelling carbon sources and sinks in terrestrial vegetation // *New Phytologist*. – 2019. – V. 221. – P. 652–668. <https://doi.org/10.1111/nph.15451>.

3. Luo Y., Zhou X. Soil respiration and the environment. – Elsevier, 2010. – 333 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088782-8.X5000-1>.

4. LI-8100A. Automated soil CO<sub>2</sub> flux system. LI-8150 Multiplexer. Instruction manual. – Nebraska, 2012. – 396 p.

5. Pridacha V.B., Sazonova T.A., Novichonok E.V., Semin D.E., Tkachenko Yu.N., Pekoev A.N., Timofeeva V.V., Bakhmet O.N., Olchev A.V. Clear-cutting impacts nutrient, carbon and water exchange parameters in woody plants in an east Fennoscandian pine forest // *Plant Soil*. – 2021. – V. 466. – P. 317–336. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05058-w>.

6. Niinistö S.M., Kellomäki S., Silvola J. Seasonality in a boreal forest ecosystem affects the use of soil temperature and moisture as predictors of soil CO<sub>2</sub> efflux // *Biogeosciences*. – 2011. – V. 8. – P. 3169–3186. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3169-2011>.

7. Mahnykina A.V., Prokushkin A.S., Menyailo O.V., Verkhovets S.V., Tychkov I.I. et al. The impact of climatic factors on CO<sub>2</sub> emissions from soils of middle-taiga forests in Central Siberia: emission as a function of soil temperature and moisture // *Russian Journal of Ecology*. – 2020. – V. 51. – P. 46–56. <https://doi.org/10.1134/S1067413620010063>.

## ДРЕВЕСНЫЕ РАСТЕНИЯ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА В УСЛОВИЯХ МЕНЯЮЩЕЙСЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Придача В.Б., Семин Д.Е., Туманик Н.В., Сазонова Т.А.

Институт леса КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», ул. Пушкинская,  
11, Петрозаводск, Россия, pridacha@krc.karelia.ru

Исследованию бореальных экосистем северного полушария в последнее время уделяется повышенное внимание, поскольку для этой зоны прогнозируются наиболее значительные климатические изменения, сопровождаемые ростом температуры, изменением режима осадков и ростом повторяемости аномальных явлений погоды (IPCC, 2013), что может привести к существенным изменениям в структуре и функционировании таежных экосистем. Оценка устойчивости лесных сообществ и отдельных видов к внешним воздействиям требует проведения исследований возможных ответных реакций наземной растительности на прогнозируемые изменения климата. Помимо меняющегося климата, существенное влияние на природные экосистемы оказывают и антропогенные факторы. В настоящее время рубка леса является определяющим фактором трансформации лесных сообществ на большей части таежных территорий (FAO, 2020). Динамичность процессов, происходящих на вырубках в основном под влиянием естественных факторов, делает их хорошим модельным объектом для изучения отклика растительных сообществ на изменения природной среды. Отклик растений на изменения условий среды проявляется в первую очередь в изменении интенсивности протекания их основных физиологических процессов, и прежде всего, углеродного и водного обмена. Вместе с тем, сохраняется некоторая неопределенность в понимании роли функциональной пластичности отдельных видов в сукцессионных процессах и при адаптации растений к факторам среды.

Лесные экосистемы в Карелии представлены преимущественно сосновой, еловой, березовой, осиновой и ольховой формациями, что позволяет провести межвидовую оценку адаптивного потенциала растений в естественных условиях произрастания, и представляет особую ценность при прогнозировании возможного отклика как отдельного вида, так и лесной экосистемы в целом на изменения природной среды и климата. Целью настоящей работы была комплексная межвидовая оценка функциональных показателей хвойных и лиственных видов древесных растений в условиях антропогенной трансформации фитоценоза, в частности сплошной вырубке сосняка черничного. Рабочей гипотезой исследования послужило предположение, что систематически разные виды покажут схожую реакцию функциональных параметров на изменение условий внешней среды. Для проверки гипотезы провели анализ влияния биогеоценотических и климатических условий на функциональные характеристики одновозрастных деревьев сосны (*Pinus sylvestris* L.), березы (*Betula pendula* Roth), осины (*Populus tremula* L.) и ольхи (*Alnus incana* (L.) Moench) на сплошной вырубке и под пологом сосняка черничного в условиях среднетаежной подзоны Карелии.

Полевые исследования показателей  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ -обмена древесных растений проводили в европейской части средней тайги (Республика Карелия, Кондопожский район) в июле в период с 2016 по 2019 гг. Объектами исследований послужили одновозрастные деревья сосны, березы, осины и ольхи, произрастающие на сплошной вырубке 2009 г. сосняка черничного и под пологом ненарушенного 95-летнего сосняка черничного (Рисунок 1). Измерения устьичной проводимости ( $g_s$ , моль  $\text{m}^{-2} \text{c}^{-1}$ ), интенсивности фотосинтеза ( $A$ , мкмоль  $\text{m}^{-2} \text{c}^{-1}$ ) и транспирации ( $E$ , ммоль  $\text{m}^{-2} \text{c}^{-1}$ ) листа (хвои) древесных растений на вырубке и под пологом зрелого древостоя проводили на неотделенных листьях в средней части кроны с помощью портативной фотосинтетической системы LI-6400XT (LI-

COR Inc., США) по единой методике в стандартной листовой камере с источником света LI-6400-02B LED (LI-COR Inc.) при освещенности  $1600 \text{ мкмоль/м}^2 \text{ с}$ , концентрации  $\text{CO}_2$   $400 \text{ мкмоль/моль}$ , температуре воздуха  $23^\circ\text{C}$  и интенсивности потока воздуха  $400 \text{ мкмоль/с}$  (Pridacha et al., 2021). Измерения водного потенциала ( $\Psi$ , МПа) проводили на отделенном облиственном побеге с помощью камеры давления Plant Moisture Vessel SKPM 1400 (Skye Instruments Ltd., United Kingdom) одновременно с измерением газообмена. Для определения минерального состава растений образцы листьев березы, осины, ольхи и однолетней хвой сосны отбирали из средней части кроны дерева. Определение содержания углерода (C, %) и азота (N, %) выполняли с помощью элементного анализатора PE-2400 (Perkin Elmer, США); калия ( $K_w$ , %), кальция ( $Ca_w$ , %), магния ( $Mg_w$ , %) – методом атомно-абсорбционной и атомно-эмиссионной спектроскопии на атомно-абсорбционном спектрофотометре AA-7000 (Shimadzu, Япония); фосфора ( $P_w$ , %) – спектрофотометрическим методом с молибденовой синью с помощью СФ-2000 (ОКБ-спектр, Россия). Для оценки взаимосвязи химического элементного состава внешней (почва) и внутренней сред растения использовали коэффициент биологического поглощения (КБП), рассчитанный по отношению содержания минерального элемента в листе (хвое) растения к его содержанию в органогенном горизонте почвы.

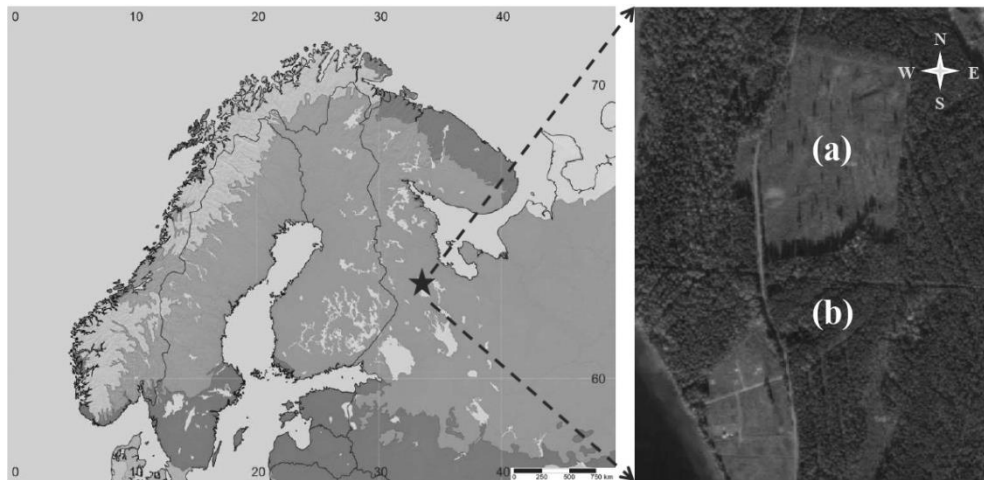


Рисунок 1. Местоположение (отмечено звездочкой) сплошной вырубке (а) и сосняка черничного свежего (б) в районе исследования.

Для определения гидравлических характеристик ксилемы с модельных деревьев каждого вида на обоих экспериментальных участках в последней декаде августа отбирали образцы древесины ствола (Pridacha et al., 2023). Поперечные срезы древесины толщиной  $30 \text{ мкм}$  изготавливали на замораживающем микротоме Frigomobil 1205 (Leica, Германия). Срезы окрашивали 1% водным раствором сафранина и помещали в глицерин. Микрофотографии срезов древесины получали на световом микроскопе AxioImager A1 (Karl Zeiss, Германия) с помощью фотокамеры ADF PRO03 и программного обеспечения ADF Image Capture (ADF Optics, Китай). На микрофотографиях с помощью программы ImageJ v. 1.50 (НИН, США) на сериях из 4-х полных годовичных колец за период 2016–2019 гг. измеряли приросты ксилемы, толщину стенок и радиальный диаметр люмена сосудов (трахеид), подсчитывали их число на единицу площади древесины. Потенциальную гидравлическую проводимость рассчитывали с учетом плотности и гидравлического диаметра сосудов (трахеид) согласно закону Хагена-Пуазейля (Sterck et al., 2008).

В результате проведенного исследования у разных видов в градиенте микроклиматических и фитоценологических условий выявлены однонаправленные изменения устьич-

ной проводимости, интенсивности фотосинтеза и транспирации, емкости биологического поглощения макроэлементов (Pridacha et al., 2021). Видоспецифичность реакции в меняющихся условиях установлена для фотосинтетической эффективности использования воды и азота, соотношений биогенных элементов (C : N, N : P : K, K : Ca : Mg). На основании вариабельности эколого-физиологических показателей сосны и лиственных видов в условиях гетерогенной среды сделан вывод о разном адаптационном потенциале исследуемых видов растений. Межвидовая оценка гидравлических характеристик ксилемы и их согласованности с показателями CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-газообмена хвойного и лиственных растений в градиенте экологических условий также выявила видоспецифические изменения координации гидравлических характеристик, устьичной проводимости, интенсивности фотосинтеза и транспирации, что указывает на разные стратегии гидравлического поведения (isohydric/anisohydric) у березы, осины и сосны (Pridacha et al., 2023). Выявленные закономерности позволяют предположить, что увеличение повторяемости аномальных погодных явлений в высоких широтах, в частности периодов сильной жары и засухи, может усилить конкурентоспособность сосны и осины, формирующих более эффективную и безопасную гидравлическую структуру, относительно березы, ксилема которой более уязвима к кавитации при засухе, посредством роста CO<sub>2</sub>-газообмена и продуктивности в засушливых условиях. Результаты исследования важны для понимания ключевых механизмов влияния условий внешней среды на CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-газообмен древесных растений при изменяющихся климатических условиях в лесных экосистемах с разной степенью антропогенной нарушенности, а также для прогнозных оценок популяционных стратегий древесных растений в условиях изменения природной среды и климата.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

1. IPCC Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. – Cambridge University Press, Cambridge. – 1535 p.

2. FAO. Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings. – Rome, 16 p. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.

3. Pridacha V.B., Sazonova T.A., Novichonok E.V., Semin D.E., Tkachenko Yu.N., Pekoev A.N., Timofeeva V.V., Bakhmet O.N., Olchev A.V. Clear-cutting impacts nutrient, carbon and water exchange parameters in woody plants in an east Fennoscandian pine forest // Plant Soil. – 2021. – V. 466. – P. 317–336. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-05058-w>.

4. Pridacha V.B., Tarelkina T.V., Neronova Ya. A., Tumanik N.V. Significance of coordination between stem xylem traits and leaf gas exchange parameters during adaptation formation in some boreal species of Karelia // Botanicheskii Zhurnal. – 2023. – V. 108. – P. 690–708. <https://doi.org/10.31857/S000681362306008X>.

5. Sterck F.J., Zweifel R., Sass-Klaassen U., Chowdhury Q. Persisting soil drought reduces leaf specific conductivity in Scots pine (*Pinus sylvestris*) and pubescent oak (*Quercus pubescens*) // Tree Physiol. – 2008. – V. 28(4). – P. 529–36. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.4.529>.

## ПОЖАРНАЯ АКТИВНОСТЬ И ДИНАМИКА ЛАНДШАФТОВ В ПРЕДГОРЬЯХ СЕВЕРНОГО АЛТАЯ С ПОЗДНЕЛЕДНИКОВЬЯ ДО СОВРЕМЕННОСТИ

*Пунышева М.А.<sup>1</sup>, Бляхарчук Т.А.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
455207@mail.ru;

<sup>2</sup>Томский государственный университет, blyakharchuk@mail.ru

С конца XXI века и по настоящее время на территории России наблюдается рост пожарной активности [1-2]. Пирогенному влиянию подвержены и горные территории, одной из которых является Алтай-Саянский горная страна [3-4]. Только с 1996 по 2014 гг. здесь произошло 32500 лесных пожаров общей площадью 12,2 млн. га [4]. По данным некоторых источников [3-4], увеличение числа пожаров происходит на фоне изменения климата, выражающегося в увеличении среднегодовой температуры воздуха и количестве экстремальных погодных явлений. К тому же, к середине XXI века для южных районов Сибирского федерального округа прогнозируется повышение температуры воздуха на 2-3°C [1]. Впоследствии это может привести к возникновению новых лесных пожаров. Для защиты и сохранения уникальных ландшафтов Алтай-Саянской горной страны необходимо составлять долговременные прогнозы пожарной активности в зависимости от изменений климата и сопутствующих им геоэкологических условий. Но современных спутниковых или архивных данных о динамике и интенсивности пожаров недостаточно [4], поскольку они содержат информацию лишь за последние несколько десятилетий. Поэтому возникает необходимость в реконструкции долговременной истории пожаров от позднеледниковья до современности, чтобы выявить общую взаимосвязь климата, растительности и пожаров в прошлом. В результате, эти данные можно использовать для прогнозирования общей тенденции будущей пожарной активности в регионе и способствовать дальнейшим исследованиям по моделированию пожарной активности. Поэтому, целью нашей работы является реконструкция долговременной динамики пожаров и ландшафтов на примере одного из участков Алтай-Саянской горной области.

Для достижения данной цели, нами исследована территория в предгорьях Северного Алтая на левом берегу реки Катунь. Предгорья Северного Алтая являются естественной границей между степными ландшафтами Предальтайской равнины и низкогорной частью Алтай-Саянского региона, покрытой лесами. Поскольку одним из наиболее надежных источников сохранения палеоэкологической информации являются озерно-болотные отложения, в качестве объекта исследования мы выбрали болото Моховое. Болото Моховое (Северный Алтай) расположено в 4 км к юго-востоку от пос. Ая (Алтайский край). Болото Моховое расположено внутри замкнутой впадины длиной 600 м и шириной 200 м, дно впадины превышает уровень Катуни на 14 м.

По одной из гипотез, впадина исследуемого болота является следом зоны водоразрыва вследствие катастрофического падения уровня воды в результате прорыва сейсмооползневой дамбы в долине Катуни у села Рыбалка [5-6]. Но эта версия была подвергнута сомнению в более поздних работах. На данный момент существует не менее 10 гипотез формирования бассейна: эврссионно-кавитационная [7], ледниковая [8], тектоническая [9] и другие. Но этот вопрос остается предметом дискуссий. Ввиду недостаточности палеоэкологических данных по этому региону происхождение и эволюция болотного бассейна Мохового представляют неподдельный интерес для изучения его отложений. Эти знания внесут ценный вклад в реконструкцию условий окружающей среды прошлого.

Во время полевых работ в 2017 году был отобран керн торфяного массива «Моховое» мощностью 640 см для комплексных палеоэкологических исследований. В результате было отобрано 130 образцов по всей длине керна с интервалом в 5 см для дальнейшей обработки в лаборатории. Радиоуглеродное датирование 5 образцов проведено в Национальном университете Тайваня методом AMS (табл. 1). На основе радиоуглеродных дат, откалиброванных в программе Bacon [10] в R version 4.0.4 [11] в системе счисления «от настоящего времени» (за нулевую точку отчета принят 1950 г.), построена глубинно-возрастная модель отложений болота Моховое и рассчитан возраст остальных слоев торфяной колонки.

**Таблица 1. Радиоуглеродные даты торфяных отложений болота «Моховое»**

Лабораторный код	Глубина образца (см)	Возраст, <sup>14</sup> C лет назад
NTUAMS-5535-1	90	2112±68
NTUAMS-5541-1	190	4193±71
NTUAMS-5530-1	385	7153±92
NTUAMS-5531	565	10028±83
NTUAMS-5532-1	637	13448±84

Для реконструкции локальной истории палеопожаров использовался метод макроуголькового анализа [12]. Данный метод позволяет восстановить динамику пожаров на основе анализа озерно-болотных отложений путем подсчета абсолютного количества частиц макроугольков (размером >125 мкр) в каждом из образцов торфяной колонки. Статистическая обработка полученных данных осуществлялась в программном пакете CharAnalysis [13], адаптированном для среды программирования R [11]. С помощью данной программы выявляются конкретные локальные пожарные эпизоды, их периодичность и интенсивность.

Региональную динамику пожаров реконструировали с помощью метода микроуголькового анализа [12], согласно стандартной методики обработки образцов. Микроугольки легче и меньше (размером 10-100 мкр) макроугольков. Микроугольки могут переноситься на дальние расстояния от очага возгорания (от 20 до 100 км), являясь индикаторами региональных пожаров. Кроме того, микроугольки сопоставимы по весу и размеру с пыльцевыми зёрнами и спорами, поэтому их анализ осуществляется сопряженно со спорово-пыльцевым [14] при тех же методах обработки и параметрах оптики. Спориво-пыльцевой анализ использовался для реконструкции динамики растительности в пределах болота «Моховое» [15].

Согласно данным радиоуглеродного датирования, осадконакопление болота Моховое началось 16185 кал. л. н. За весь период развития болота произошло 27 локальных пожарных эпизодов, сопровождающиеся кардинальной перестройкой ландшафтов [15]. С позднеледниковья и до современности произошла смена ландшафтов: от лесотундры к степи и горным лесам. Кроме того, развитие болота Моховое началось всего лишь 10 000 кал. л. н., а до этого на его месте находилось озеро. Полученные результаты по динамике палеопожаров и растительности были сопоставлены с климатическими периодами для Западной Сибири [16], что позволило нам выявить 8 основных этапов ландшафтных изменений:

1. В среднем дриасе (DR-2) были распространены лесотундровые ландшафты с доминированием кедрово-лиственнично-еловых лесов. Локальных пожаров в это время не выявлено, хотя наличие микроугольков в отложениях свидетельствует о региональных пирогенных очагах. Кроме того, в DR-2 самого болота еще не существовало, а донные отложения представлены глинами.



2. Потепление климата в начале аллерёда (AL) ознаменовалось сменой ландшафтов с лесотундровых на степные. В растительном покрове стали преобладать разнотравно-полынные степи. Начиная с 14500 кал. л. н. на месте современного болота Моховое сформировалось озеро, просуществовавшее до 10000 кал. л. н. В середине аллерёда произошло 2 небольших палеопожарных эпизода (14250, 13800 кал. л. н.) при скорости аккумуляции угля до 4 частиц/см<sup>2</sup>/год. Эти локальные пожарные эпизоды совпадают с региональной динамикой пожаров. Вероятно, на рост пожарной активности повлияли теплые климатические условия этого периода.

3. В позднем дриасе (DR-3) значительную площадь занимали степные фитоценозы. С середины DR-3 постепенно возрастает пирогенная активность, приведшая к 1 локальному палеопожару (12350 кал. л. н.) при скорости аккумуляции угля до 10 частиц/см<sup>2</sup>/год.

4. В пребореальном периоде (PB) наблюдался значительный рост пожаров. Вероятно, степные полынные сообщества, произрастающие в данной местности, могли служить горючим материалом для пожаров. За весь PB период произошло 4 локальных пожарных эпизода (11800, 11400, 11100, 10800 кал. л. н.) при скорости аккумуляции угольков от 15 до 32 частиц/см<sup>2</sup>/год. При том, что пик пожаров пришелся на конец пребореала, в период, когда степи стали отступать на смену горным лесам. Кроме того, динамика микро- и макроугольковых частиц в целом совпала, что также указывает на региональный характер пожаров того времени.

5. В бореальном периоде голоцена (BO) доминирующую позицию в растительном покрове заняла березовая лесостепь. Кроме того, примерно 10000 кал. л. н. на озере стали происходить процессы заболачивания, приведшие к формированию гипнового болота. По сравнению с предыдущим периодом голоцена в бореале в целом снизилась пожарная активность. Хотя программой CharAnalysis зафиксировано 3 небольших локальных пожарных эпизода (10200, 9750, 9000 кал. л. н.) со скоростью аккумуляции угольков от 6 до 19 частиц/см<sup>2</sup>/год. Вероятно, более влажные условия климата могли способствовать уменьшению интенсивности пожаров.

6. Пик пожарной активности и резкой смены ландшафтов пришелся на атлантический период голоцена (AT). В начале периода в растительном покрове преобладали березовые леса, сменившиеся 7000 кал. л. н. на сосново-березовые. Вероятно, потепление климата способствовала смене растительных формаций. В стадии развития болота также произошли изменения: 8500 кал. л. н. на месте гипнового болота сформировалось древесно-осоковое, просуществовавшее вплоть до 6000 кал. л. н. В конце AT на болоте произошли крупные локальные пожары, что, вероятно, спровоцировало перестройку болота с древесно-осокового на кочкарно-осоковое. За весь атлантический период произошло 9 локальных пожарных эпизодов (8400, 8100, 7800, 7450, 7200, 6600, 6350, 5950, 5450 кал. л. н.) с пиком пирогенной активности в конце AT периода – 5450 кал. л. н. (70 частиц/см<sup>2</sup>/год).

7. В начале суббореального периода (SB) сосново-березовые леса сменились на березово-сосновые. Это могло быть связано с крупными локальными пожарами, произошедшими в этот период. Кочкарно-осоковое болото просуществовало до 3000 кал. л. н., сменившись на осоковое болото. С начала суббореала интенсивность пожаров постепенно понижалась, достигнув минимальных значений в период 4400-3000 кал. л. н. За весь суббореальный период произошло 6 локальных пожаров (4800, 4400, 3800, 3600, 3400, 2900 кал. л. н.) с пиками пирогенной активности на границе AT/SB (5200 кал. л. н.), в начале периода (4700 кал. л. н.) и в конце SB (2900 кал. л. н.) со скоростью аккумуляции угольков от 70 до 50-52 частиц/см<sup>2</sup>/год соответственно. Кроме того, локальный пик пожаров 4700 кал. л. совпал с региональным пиком пирогенной активности, что также свидетельствует о серии крупных пожаров как в окрестностях болота, так и за его пределами.

8. В субатлантическом периоде (SA) также произошли изменения: на месте осокового болота 1000 кал. л. н. возникло мезотрофное сфагновое болото, существующее по настоящий момент. 1000 кал. л. н. березово-сосновые леса сменились на сосново-березовые. Пожарная активность с начала периода постепенно снижалась. Отмечено 2 локальных пожарных эпизода (2200,

1490 кал. л. н.) при скорости аккумуляции угольков от 37 до 14 частиц/см<sup>2</sup>/год соответственно. Примечательно, что с 1000 кал. л. н. и по настоящее время пожарная активность снизилась до минимальных значений.

Осадконакопление болота Моховое началось 16185 кал. л.н., охватив позднеледниковье и весь голоцен. В DR-2, когда территория была занята преимущественно лесотундрой, локальных пожаров не было. Предполагается, что максимум пирогенной активности пришелся на период АТ, когда произошло 9 локальных палеопожаров. В это время в растительном покрове стали доминировать сосново-березовые леса. Полученные результаты свидетельствуют о прямом влиянии изменения климата и динамики ландшафтов на интенсивность и масштабы палеопожарной деятельности.

Работа выполнена при поддержке государственной бюджетной темы ИМКЭС СО РАН № 121031300226-5.

1. Лебедев С.А. и др. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова // Научные технологии. Росгидромет. Санкт-Петербург. 2022. 676 С.

2. Bondur V.G., Mokhov I.I., Voronova O.S., Sitnov S.A. Satellite monitoring of Siberian wild-fires and their effects: Features of 2019 anomalies and trends of 20-year changes // *Doklady Earth Sciences*. Pleiades Publishing. 2020. V. 492. № 1. pp. 370–375.

3. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Kharuk V. I. Fires in the Altai-Sayan region: Landscape and ecological confinement // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2016. – Т. 52. – С. 725-736.

4. Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона в условиях наблюдаемых изменений климата // *Сибирский экологический журнал*. – 2016. – Т. 23. – №. 1. – С. 38-46.

5. Малолетко А.М., Прудникова Н.Г., Кириллова Т.В., Кондратова М.В., Бурмистрова, О. С., Безматерных Д.М., Барышников О.Н. Озеро Ая и его окрестности. – 2004.

6. Малолетко А. М. О происхождении Майминского вала (Алтай) // *Вопросы географии Сибири*. – 1980. – С. 92-98.

7. Русанов Г. Г., Важов С. В. Нерешённые проблемы озёр Манжерокское и Ая. – 2017.

8. Селедцов, Н.Г. Айское, Манжерокское и Теньгинское озёра Горного Алтая / Н.Г. Селедцов // *Известия Алтайского отдела Географического Общества СССР*, 1963, вып. 2. – С. 54–73.

9. Гончарова, Е.И. Санитарная оценка современного состояния озера Ая Алтайского края [Текст] / Е.И. Гончарова, Т.М. Тронова, А.А. Коханенко // *Курортология и физиотерапия Сибири в концепции развития здравоохранения и медицинской науки Российской Федерации*. Мат–лы науч. конф. – Томск, 2002.

10. Blaauw M., Christen J.A. Flexible paleoclimate age-depth models using an 601 autoregressive gamma process // *Bayesian Analysis*. – 2011. – Vol. 6. – P. 457–474.

11. R Core Team R: a language and environment for statistical computing [Электронный ресурс]: R foundation for statistical computing. – 2020. – Vienna. – URL: [www.r-project.org/index.html](http://www.r-project.org/index.html) (дата обращения: 20.04.2023)

12. Mooney S., Tinner W. The analysis of charcoal in peat and organic sediments // *Mires Peat*. 2011. Vol. 7. P. 1–18.

13. Higuera P. CharAnalysis 0.9: Diagnostic and analytical tools for sediment-charcoal analysis. Bozeman: MT, Montana State University, 2009. 27 p.

14. Гричук В.П., Заклинская Е.Д. Анализ ископаемой пыльцы и спор и его применение в палеогеографии. М.: Географиздат, 1948. 223 с.

15. Бляхарчук Т. А. Динамика растительного покрова западных предгорий Алтая в позднеледниковье и голоцене по данным спорово-пыльцевого анализа торфяных отложений болота «Моховое» // *Актуальные проблемы современной палинологии*. – 2022. – С. 53-56.

16. Архипов С.А., Волкова В.С. Геологическая история, ландшафты и климаты плейстоцена Западной Сибири. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН. 1994. 105 с.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДРЕВЕСНО-КОЛЬЦЕВЫХ ХРОНОЛОГИЙ ЗАПАДНОГО И ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Сат С.А., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Батоцыренов Э.А., Супруненко А.Г.  
Байкальский институт природопользования СО РАН, г. Улан-Удэ, saygaa@mail.ru

Как известно, проблема потепления климата имеет глобальный масштаб. В третьем оценочном докладе Росгидромет отмечается, что в России температура воздуха у поверхности земли повышается почти вдвое быстрее, чем на всей суше – на 0,51 °С за десятилетие, при этом каждое десятилетие теплее предыдущего [1]. Это отражается и на территории Забайкалья. Исследования показывают, что на территории Забайкалья также наблюдается повышение температуры воздуха [2], которое, в свою очередь, проявлялось еще в XVII-XVIII вв. [3].

Изменения метеорологических факторов, включая температуру, осадки, влажность и интенсивность света оказывают значительное влияние и на рост деревьев. Древесная растительность степной и лесостепной природных зон произрастают в условиях, где режим увлажнения определяет их рост, что делает их потенциальными индикаторами климатических изменений [4, 5].

Цель данной работы заключается в определении общих и отличительных характеристик климатического отклика в радиальном приросте деревьев в Западном и Восточном Забайкалье, а именно в определении периодов сильной засухи и повышенной увлажненности в данных регионах. Знание их периодичности и продолжительности носит практическую значимость для сельского и лесного хозяйства.

Материалы в виде древесных кернов были отобраны в лесостепной зоне Восточного Забайкалья в долине р. Ямаровка (с. Ямаровка) в географических координатах 50°36' с.ш. 110°15' в.д. В результате кросскорреляционного анализа и перекрестной датировки была получена обобщенная древесно-кольцевая хронология (ВТJ) по 17 образцам модельных деревьев сосны обыкновенной (*Pinus Sylvestris L.*). Сбор, обработка и анализ образцов проводились по стандартным методам дендрохронологии [6] на полуавтоматической установке Lintab 5 в специализированной программе TsapWin [7].

Стандартизацию временных рядов и качество индексированной хронологии оценивали с помощью программного пакета RCSSigFree и COFECNA по следующим показателям: межсерийный коэффициент корреляции ( $r=0,65$ ), стандартное отклонение (0,72), автокорреляция 1-го порядка (0,88), коэффициент чувствительности (0,23), выраженный сигнал популяции - Expressed Population Signal (EPS) $>0,85$  начинается у хронологии с 1817 г. Для сравнительной оценки использована генерализированная древесно-кольцевая хронология (Chr) построенная по хронологиям восточной части Западного Забайкалья из предыдущих исследований [8].

Далее за общий выбранный период с 1811 г по настоящее время были выявлены:

1) Годы сильной засухи (ниже 10-й процентиля – значения индекса прироста  $< -1,29$  для Западного и  $< -1,23$  для Восточного Забайкалья);

2) Годы повышенной влажности (выше 90-й процентиля – значения индекса прироста  $> 1,31$  для Западного и  $> 1,36$  для Восточного Забайкалья).

Характерная особенность для территории Забайкалья – цикличность в изменениях уровня влажности, где чередуются периоды повышенной увлажненности с последующим периодом их дефицита, нередко сопровождающиеся засухами.

Сравнение древесно-кольцевых хронологий исследуемых территорий позволило выявить различия и совпадения в периодичности засушливых и влажных лет. Как видно из таблицы 1, в Восточном Забайкалье по хронологии ВТJ наиболее длительный период

засухи наблюдался с 1874 по 1878 гг. В Западном Забайкалье по хронологии Chr период продолжительной засухи приходится на 1977-1982 гг., с длительностью 5 и 6 лет.

Отмечено, что Восточное Забайкалье выделяется по длительности влажных периодов, где проявлялись в 1826-1830 гг., также с продолжительностью 9 лет влажные условия были наиболее выражены с 1890 по 1899 гг. В Западном Забайкалье отмечаются короткие периоды влажности продолжительностью 3-4 года (1907-1910; 1932-1934; 1937-1940 гг.).

**Таблица 1. Наиболее засушливые и влажные периоды в Западном (Chr) и Восточном Забайкалье (BTJ)**

Chr	Index < 10-й проценти	BTJ	Index < 10-й проценти	Chr	Index > 90-й проценти	BTJ	Index > 90-й проценти
1838	-1,71	1816	-1,78	1820	1,32	<b>1826*</b>	2,17
1840	-1,64	1823	-3,20	1830	1,35	<b>1827*</b>	2,53
1843	-1,36	1845	-1,35	1856	1,35	<b>1828*</b>	1,40
1844	-1,83	<b>1874*</b>	<b>-1,30</b>	1867	1,64	<b>1829*</b>	1,51
1850	-1,61	<b>1875*</b>	<b>-1,92</b>	1870	1,66	<b>1830*</b>	2,63
1888	-1,85	<b>1876*</b>	<b>-1,53</b>	<b>1907*</b>	1,83	1834	1,66
1889	-1,72	<b>1877*</b>	<b>-1,94</b>	<b>1908*</b>	2,91	1837	1,63
1954	-1,55	<b>1878*</b>	<b>-1,28</b>	<b>1909*</b>	2,64	<b>1890*</b>	1,50
1955	-1,70	1880	-1,51	<b>1910*</b>	1,52	<b>1891*</b>	1,99
1956	-1,81	1883	-1,99	<b>1932*</b>	2,06	<b>1892*</b>	1,61
1958	-1,43	1884	-1,54	<b>1933*</b>	2,68	<b>1893*</b>	2,71
1969	-1,68	1918	-1,24	<b>1934*</b>	1,55	<b>1894*</b>	1,80
<b>1977*</b>	<b>-1,62</b>	1940	-1,24	<b>1937*</b>	1,56	<b>1895*</b>	3,00
<b>1978*</b>	<b>-1,88</b>	1946	-1,54	<b>1938*</b>	1,56	<b>1896*</b>	2,10
<b>1979*</b>	<b>-1,51</b>	1947	-1,64	<b>1939*</b>	1,58	<b>1897*</b>	2,19
<b>1980*</b>	<b>-2,24</b>	1955	-1,56	<b>1940*</b>	1,52	<b>1898*</b>	1,65
<b>1981*</b>	<b>-2,03</b>	1956	-1,38	1991	1,45	<b>1899*</b>	1,40
<b>1982*</b>	<b>-1,58</b>	1969	-2,66	1995	1,43	1904	1,48
2003	-1,90	1978	-1,78	1998	1,50	1908	1,92
2014	-1,32	1981	-1,62	2001	1,75	1909	2,11
2015	-1,80	2003	-2,46	2005	1,38	1985	1,60
-	-	2017	-1,26	-	-	-	-

Примечание: \* – годы продолжительной засухи и продолжительной повышенной влажности.

Кроме того, выявлены совпадающие годы сильной засухи, как в Западном, так и в Восточном Забайкалье – 1955, 1956, 1969, 1978, 1981, 2003 гг. (рис. 1). Выявленные годы совпадений засух подтверждают исторические записи. Так из хронологии и летописи явлений природы известно, что в эти годы была засуха в Северной части Монголии, к тому же отмечены лесные пожары в Восточном и Южном Прибайкалье, а также в Баргузинской долине. В Забайкальском крае в 2003 году 216 тыс. га посевов были уничтожены из-за засухи и нашествия саранчи [9].

Совпадающие годы повышенной влажности приходятся на 1830, 1908, 1909 гг. По историческим данным в 1830 г. было сильное наводнение на р. Селенга, также из-за

обильных дождей наблюдались наводнения на реках юга Восточной Сибири. Из исторических сведений в 1908 и 1909 гг. были зафиксированы лесные пожары в Прибайкалье, а в Якутске сильная жара и засуха, которая привела к потере урожая. Однако, согласно данным древесно-кольцевых хронологий, данные годы были характеризованы повышенной увлажненностью. Если исторические данные представляют собой оценку общих климатических событий, а дендрохронологические в определенной локации, то расхождение может быть вызвано разницей в пространственной изменчивости.

Также стоит отметить, что в 1940 г. была выявлена несинхронность климатических условий в изучаемых областях: в Западном Забайкалье год был characterized высокой влажностью, в то время как в Восточном Забайкалье наблюдалась засуха. Формирование узких годичных колец также может быть обусловлено не только засушливыми условиями, но и от влияния большого количества осадков и низких температур [10]. Данные различия вероятнее всего обусловлены географическим положением, а также цикличностью и неравномерностью атмосферных осадков.

Оценка потерь лесного покрова на территории Бурятии [11], включая Западное Забайкалье [12], позволила выявить годы катастрофических пожаров – 2003-2004 и 2015-2017 гг. Самые крупные пожары приходятся на 2015 год, в результате которых выгорело 890 тыс. га лесных площадей. Этому способствовали весенние и летние засухи. В Западном Забайкалье значение индекса прироста в 2015 году было ниже 10-й перцентили, что свидетельствует год как экстремально засушливый. В то же время, в Восточном Забайкалье год был менее засушливым, так как значение индекса прироста не достигало данной перцентили.

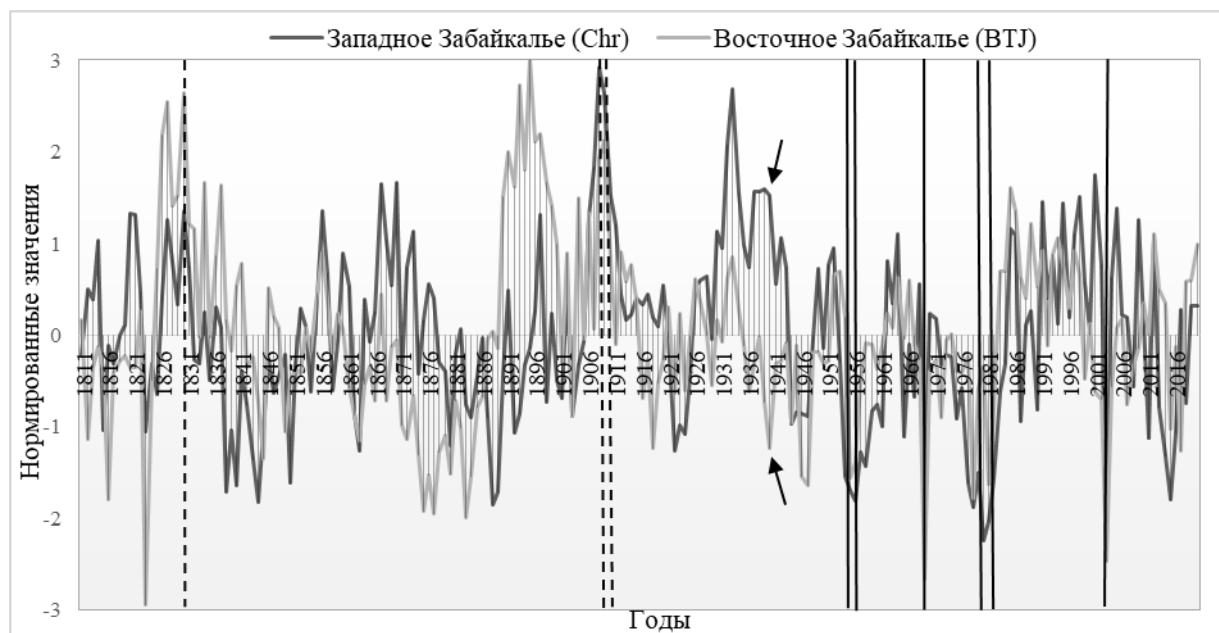


Рисунок 1. Совпадающие годы наиболее засушливых и влажных периодов по древесно-кольцевым хронологиям Западного и Восточного Забайкалья (темно-серым цветом обозначено Западное Забайкалье, серым цветом обозначено Восточное Забайкалье, вертикальные линии – годы сильной засухи, пунктирные вертикальные линии – годы повышенной влажности, стрелка указывает на асинхронный год).

Сравнительный анализ древесно-кольцевых хронологий Западного и Восточного Забайкалья позволил выявить длительные периоды наиболее засушливых и влажных лет, также были обнаружены годы экстремальной засухи и повышенной увлажненности, ко-

торые совпадали в обоих регионах. В целом отмечено, что в XIX веке в Восточном Забайкалье преобладали годы повышенной влажности, в то время как в XX-XXI вв. климатические условия стали более засушливыми. Экстремально засушливые годы зафиксированы в 1823, 1969, 2003 гг. В Западном Забайкалье с XIX в. По настоящее время отмечается цикличность в засушливых и влажных годах, тем не менее, годы экстремальной засухи выявлены во второй половине XX века (1980, 1981 гг.).

Исходя из этого, можно сделать вывод, что климатические условия в Забайкалье, как восточной, так и западной части, имеют свои особенности и подвержены согласованным колебаниям. Однако, общая характерная картина, которая была выявлена для территории Забайкалья в целом, это смена климатических условий на более засушливый режим, особенно это отражается с середины XX века.

1. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – СПб.: Научное издание, 2022. – 124 с.

2. Гармаев Е.Ж., Пьянков С.В., Шихов А.Н., Аюржанаев А.А., Содномов Б.В., Абдуллин Р.К., Цыдыпов Б.З., Андреев С.Г., Черных В.Н. Картографирование современных изменений климата в бассейне реки Селенга // Метеорология и гидрология. 2022. №2. с. 62-74.

3. Обязов В.А. Изменения современного климата и оценка их последствий для природных и природно-антропогенных систем Забайкалья: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. – Чита: Читинская городская типография, 2014. – 39 с.

4. Андреев С. Г., Тулохонов А. К., Наурзбаев М. М. Региональные закономерности изменчивости прироста сосны в степной зоне Бурятии // География и природные ресурсы. - 2001. - № 1. - С. 73-78.

5. Андреев С. Г., Наурзбаев М. М., Тулохонов А. К., Ваганов Е. А. Радиальный прирост деревьев как индикатор длительных изменений гидрологического режима в бассейне озера Байкал // География и природные ресурсы. - 2002. - № 1. - С. 35-43.

6. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С., Наурзбаев М.М., Хантемиров Р.М. Методы дендрохронологии. Ч. I. Основы дендрохронологии. Сбор и получение древесно-кольцевой информации: Учебно-метод. пособие. Красноярск: КрасГУ, 2000. 80 с.

7. Rinn, F. TSAP-Win: Time Series Analysis and Presentation for Dendrochronology and Related Applications, Version 4.64. Rinntech, Heidelberg, Germany. – 2011.

8. Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптивные меры (сельское и лесное хозяйство)» (под редакцией Р.С.-Х. Эдельгериева). Том 3. М.: ООО «Издательство МБА», 2021. – 700 с.

9. Задонина Н.В. Хронология природных и социальных феноменов в Сибири и Монголии: монография / Н.В. Задонина, К.Г. Леви. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2008. – 759 с.

10. Матвеев, С. М. Дендрохронология: учебное пособие / С. М. Матвеев, Д. Е. Румянцев. — Воронеж: ВГЛУ, 2013. — 140 с.

11. Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Черных В.В., Жарникова М.А. Потери лесного покрова Республики Бурятия в XXI веке // Успехи современного естествознания. 2020. № 10. С. 44-49.

12. Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж., Гомбоев Б.О., Аюржанаев А.А., Содномов Б.В., Пунцукова С.Д., Андреев С.Г., Мотошкина М.А. Влияние изменения климата на экосистемные услуги лесных земель юга Восточной Сибири // Известия РАН. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 1. С. 82–97.

## **ТРАНСФОРМАЦИЯ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПОЖАРОВ НА ОСУШЕННЫХ ВЕРХОВЫХ БОЛОТАХ ТАЕЖНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ**

*Синюткина А.А.*

Сибирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства и торфа, г. Томск,  
ankalaeva@yandex.ru

Природные пожары на болотах приводят к трансформации свойств всех компонентов и свойств экосистемы – растительного покрова, торфяной залежи, характера микробиологических, гидротермических и биогеохимических процессов и, как следствие, интенсивности круговорота углерода [Ахметьева и др., 2014; Сизов и др., 2020]. На верховых болотах интенсивность выгорания определяется микротопографическими особенностями поверхности. В зависимости от исходного состояния болота до пожара, большему выгоранию могут оказаться подвержены как положительные, так и отрицательные формы микрорельефа. В условиях относительно высокого обводнения болота, интенсивность горения больше в понижениях микрорельефа [Benscoter, Wieder, 2003, Thompson, Waddington, 2013, Benscoter et al., 2015]. На более сухих болотах наблюдается обратная ситуация – большему выгоранию становятся подвержены повышения микрорельефа, в том числе сильное влияние на распространение пожара оказывают заросли кустарничков, в то время как сфагновые понижения в меньшей степени подвергаются выгоранию [Вомперский и др., 2007].

Целью исследования является анализ водно-физических свойств торфяной залежи постпирогенных участков верховых болот таежной зоны Западной Сибири через 6–8 лет после пожара с учетом их микротопографической неоднородности.

Объектами исследования являются постпирогенные участки двух верховых болот – Бакчарского и Усть-Бакчарского. Болота расположены в бассейне р. Чая (левый приток р. Обь), Бакчарское – на водораздельной равнине рек Бакчар и Икса, Усть-Бакчарское – на террасе р. Бакчар. В 1980-х гг. участки болот были осушены с целью лесомелиорации (Бакчарское болото) и добычи торфа (Усть-Бакчарское болото). В разные годы после осушения Усть-Бакчарское болото подвергалось выгоранию, последний крупный пожар произошел в 2014 г. на площади 0,5 км<sup>2</sup>. На Бакчарском болоте выгорание участка площадью около 5 км<sup>2</sup> в пределах его осушенной части произошло в 2016 г. Исследования проведены на 5 постпирогенных и 1 фоновой площадке на Бакчарском болоте. На Усть-Бакчарском болоте исследования проведены на двух площадках пожара 2014 г., в качестве фоновой площадки был выбран участок более старого пожара (около 20 лет назад) в связи отсутствием нетронутых пожаром участков на данном болоте. До пожаров изучаемые участки болот были представлены сосново-кустарничково-сфагновым растительным сообществом. Доля выгорания поверхности изменялась от 67 до 100 %. Средняя мощность торфяной залежи 2,5–3,3 м.

Для оценки водно-физических свойств торфяной залежи отбор проб торфа проведен из двух скважин в понижении и повышении микрорельефа на каждой площадке. Точки отбора выбирались визуально в местах с типичным для площадки растительным покровом. Для сопоставления слоев торфяной залежи по глубине проведена тахеометрическая съемка поверхности, с помощью которой для скважин были определены высоты относительно средней поверхности болота. Высоты скважин относительно средней поверхности в понижениях изменялись в пределах -23 – -4 см в понижениях и 2–13 см на положительных формах. Шаг отбора составлял 5 см, глубина отбора 45–90 см. Таким образом, общее количество проб составило 279. Лабораторное определение характеристик торфа проведено с использованием общепринятых методик: влажность (ГОСТ

11306-2013), зольность (ГОСТ 11306-2013), степень разложения и ботанический состав (ГОСТ 28245-89), степень гумификации и насыпная плотность торфа [Chambers, 2011].

Торфяная залежь верхних горизонтов до глубины 90 см образована преимущественно сфагновыми торфами (264 из 279 образцов). В составе растительных остатков преобладает *Sphagnum fuscum* (130 образцов с долей *S. fuscum* более 90 %, 68 образцов с примесью других сфагновых мхов, пушицы и древесных остатков), менее часто встречаются горизонты с преобладанием остатков *S. divinum* (41 образцов) и *S. balticum* (25 образцов). Редко встречаются горизонты, с преобладанием древесных, травяных и гипновых остатков (15 образцов). Сравнение характеристик разных видов торфа (Kruskal-Wallis test,  $p < 0.05$ ) не выявило значимых различий по всем рассматриваемым показателям, за исключением степени разложения, которая отличается между фускум и дивинум торфами и составляет 9 и 14 % соответственно.

Анализ свойств торфяной залежи позволил выявить различия в интенсивности проявления и глубине трансформации торфа в результате пирогенной нагрузки. Большая трансформация свойств характерна для понижений, где выгорание привело к изменению всех рассматриваемых характеристик поверхностного слоя торфа – влажности, зольности, плотности, степени разложения и степени гумификации. Изменчивость показателей между площадками определяется долей выгорания (влажность, зольность, степень гумификации) и толщиной горелого слоя (плотность). Выгорание в наибольшей степени отразилось на зольности, значения которой увеличились в 1,5–9 раз в сравнении с фоновым участком. Трансформация свойств торфа наиболее выражена в верхнем слое, непосредственно подвергавшихся горению, но различия значений между фоновыми и пирогенными участками в понижениях достигает глубины 10–15 см. Наибольшая глубина проявления различий характерна для зольности, что может происходить за счет просачивания зольных элементов вглубь торфяной залежи и частичной трансформации органического вещества под воздействием высоких температур вне зоны горения. На положительных формах микрорельефа интенсивность трансформации свойств верхнего слоя торфа оказалась менее значима в сравнении с понижениями и изменяется в ряду: сохранившиеся моховые подушки на пирогенных площадках – моховые подушки с погибшим сфагновым мхом – моховые подушки с горелым верхним слоем. В данном ряду происходит увеличение зольности верхнего слоя, уменьшение влажности, степени гумификации, степени разложения. Несмотря на меньшую интенсивность трансформации свойств торфа на положительных формах Бакчарского болота, глубина проявления трансформации оказалась выше в сравнении с понижениями, которая проявляется в повышении зольности в 1,8–2,6 раза относительно выше и ниже лежащих слоев. Глубина расположения слоя меняется между площадками в пределах 15–30 см и соответствует высоте поверхности понижений, отличающихся большей степенью выгорания и высокой зольностью верхнего горелого горизонта. Повышение зольности вероятно связано с миграцией зольных элементов из горелых понижений по всей поверхности болота, захватывая в том числе и невыгоревшие моховые подушки.

Факторный анализ всего ряда данных по слою 0–45 см показал рост степени разложения (-0,72) с глубиной (0,73), обратную зависимость влажности (0,77) с зольностью (-0,78) и плотностью торфа (-0,69). Для отрицательных форм выявлены более высокие факторные нагрузки при тех же закономерностях – обратная зависимость влажности (0,88) с зольностью (-0,85) и плотностью (-0,80). Обратная зависимость степени разложения (-0,78) и глубины (0,44) в понижениях уже не значима. Для положительных форм закономерности несколько отличаются. Наблюдается увеличение влажности (0,89) с глубиной (-0,82), а плотность (0,84) определяется степенью разложения (0,81) и в меньшей степени зольностью (0,69).



Таким образом, интенсивность и закономерности трансформации свойств торфяной залежи различаются между формами микрорельефа. Трансформация свойств проявляется в снижении влажности, увеличении зольности, плотности и степени гумификации и распространяется по глубине за пределы выгоревшего слоя. В результате исследования максимальная глубина трансформации торфяной залежи была отмечена на глубине 35 см на положительной форме микрорельефа.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.

1. Ахметьева Н.П., Белова С.Э., Джамалов Р.Г., Куличевская И.С., Лапина Е.Е., Михайлова А.В. Естественное восстановление болот после пожаров // Водные ресурсы. 2014. № 4 (том 41). С. 343–354.

2. Вомперский С.Э., Глухова Т.В., Смагина М.В., Ковалев А.Г. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах // Лесоведение. 2007. № 6. С. 35–44.

3. Сизов О.С., Цымбарович П. Р., Ежова Е. В., Соромотин А. В., Приходько Н. В. Оценка постпирогенной динамики тундровой растительности на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018) на основе данных ДЗЗ детального и высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 137–153.

4. Benschoter B.W., Greenacre D., Turetsky M.R. Wildfire as a key determinant of peatland microtopography // Canadian Journal of Forest Research, 2015, no 45, p. 1133–1137. DOI: 10.1139/cjfr-2015-0028

5. Benschoter B.W., Wieder R.K. Variability in organic matter lost by combustion in a boreal bog during the 2001 Chisholm fire // Canadian Journal of Forest Research, 2003, no 33(12), p. 2509–2513. doi:10.1139/x03-162

6. Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostructural studies of climate and peatland carbon dynamic // Mires and Peat, 2011, vol. 7, Article 07, p. 1–10.

7. Thompson D.K., Waddington J.M. Wildfire effects on vadose zone hydrology in forested boreal peatland microforms // Journal of Hydrology, 2013, no 486, p. 48–56.

## **ДИНАМИКА СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ГОРНО-ЛЕДНИКОВОМ БАССЕЙНЕ АКТРУ (СЕВЕРО-ЧУЙСКИЙ ХРЕБЕТ, РУССКИЙ АЛТАЙ) В XXI ВЕКЕ**

*Тимошок Е.Н.<sup>1</sup>, Тимошок Е.Е.<sup>1</sup>, Савчук Д.А.<sup>1</sup>, Малахов Н.Г.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
ten80@mail.ru

<sup>2</sup>Горный центр «Алтай-Актру», Республика Алтай, г. Горно-Алтайск,  
nikolay.malakhov@mechel.com

Снежный покров как важный компонент сезонной гляциосферы имеет огромное климатическое, экологическое и экономическое значение на глобальном, региональном и даже локальном уровне (Global Outlook ..., 2007), в силу чего его мониторинг необходим для разработки стратегий адаптации общества и экономики к современным климатическим изменениям на различных уровнях. Снег как экологический фактор оказывает широкое воздействие на все компоненты экосистем. Наиболее существенное положительное влияние снежного покрова на растительность выражается в защите растений и банка семян от низких зимних температур и испарения; повышении снабжения почв влагой; сокращении вегетационного периода (при максимальной мощности снежного покрова), отрицательное – снеголом, снеговал, выпревание и вымокание растений, однако мощность снежного покрова так же влияет и на животных (Яшина, 1981, Степановских, 2001 и др.).

В отечественной литературе немногочисленные работы посвящены изучению роли снежного покрова в формировании пространственно-временных особенностей фитоценозов (Мартынова, 1979, Яшина, 1981, Дмитриев и др., 1982, Горчаковский, Шиятов, 1985 и др.). Проведенные исследования показали, что именно характеристики снежного покрова определяют различия количественного участия в растительных сообществах травянистых растений, отличающихся типом корневой системы, особенностями размножения, возрастным спектром и т.д. Единичные работы посвящены изучению влияния высоты снежного покрова на движение верхней границы леса вверх в современный период потепления климата (Hagedorn et al., 2014).

Непосредственные измерения снежного покрова, требующие проведения длительных специальных и трудоемких работ в зимне-весеннее время, очень трудны в малодоступных высокогорных районах. В начале XXI века, в России значительно сократилась сеть гидрометеорологических станций, большая часть которых в Русском Алтае на протяжении всего периода метеонаблюдений была сосредоточена в долинах рек, поэтому данных для корректных характеристик снежного покрова в высокогорьях недостаточно. Учитывая сложность и мозаичность снежного покрова в Алтае-Саянской горной области, при построении карт снежного покрова Г.С. Самойловой (1980) были использованы характеристики горных, и особенно высокогорных ландшафтов и, прежде всего, наиболее выразительного их компонента – растительности. Как показывает ландшафтно-индикационная карта снежного покрова Алтае-Саянской горной области, высокогорья Северо-Чуйского хребта относятся к Чуйскому высокогорному сильно расчлененному контрастно-снежному району (Самойлова, 1980).

Целью наших исследований было проведение мониторинга высоты снежного покрова в горно-ледниковом бассейне Актру в разных высокогорных ландшафтах (на флювиогляциальных и моренных отложениях и в старовозрастных лесах) для выявления условий формирования первичной растительности на молодых постгляциальных и флювиогляциальных поверхностях и влияния снега на устойчивость высокогорных старовозрастных лесов.

Изучение динамики снежного покрова с помощью непосредственных измерений (снегосъемки) в условиях высокогорий в силу слабой доступности этих территорий в зимне-весенний период проводятся, главным образом, в модельных долинах. В высокогорьях Русского Алтая наиболее исследованным к настоящему времени является горноледниковый бассейн Актру, где зимой 1977-1978 гг. были проведены наиболее детальные исследования распределения снежного покрова (Харламов, 1981). Бассейн расположен на северном макросклоне Северо-Чуйского хребта в наиболее возвышенной части – горном узле Биш-Иирду. Как было показано профессором М. В. Троновым (1966) на основе 60-летних исследований климата и ледников Алтая, этот горноледниковый бассейн имеет широкий спектр репрезентативности: он типичен для Алтая по орографическим признакам, условиям залегания крупных ледников, ландшафтными признакам, в плане общего изучения климата и границы леса.

Для территории бассейна характерен долгий зимний период, продолжающийся с октября по апрель-начало мая. Устойчивый переход температуры воздуха через 0°C к отрицательным значениям происходит во 2-3 декаде октября; устойчивый снежный покров начинает формироваться в конце октября (Харламов, 1981, Галахов и др., 1987). По данным ГМС Актру (2150 м над ур. м.), продолжительность залегания снежного покрова на днище долины р. Актру (– в среднем около 200 дней, на водоразделе рек Актру-Ян-Карасу (2950 м н. ур. м.) – около 240 дней. Наиболее холодный зимний месяц – февраль (среднесуточные температуры –21°C), но наиболее сильные морозы (до –32-33°C) характерны для января (среднесуточные температуры –19°C). Годовое количество осадков, по данным ГМС Актру, колеблется в широких пределах: в наиболее сухой год (1974) сумма осадков составила около 380 мм, в наиболее влажные (1958, 1973, 1991) – более 750 мм. Почти 75% осадков выпадает в летнее время – от 138 мм в сухие до 400 мм во влажные годы, в среднем же около 240 мм (Галахов и др., 1987), зимние же осадки сравнительно невелики.

Как отмечали исследователи динамики снежного покрова, в конце XX века в горноледниковом бассейне Актру формирование снежного покрова очень неравномерно (Харламов, 1981, Галахов и др., 1987). Наиболее обильные снегопады отмечены в переходные сезоны года, тогда как в середине зимы количество твердых осадков значительно ниже. На продолжительность залегания снежного покрова влияют высота над уровнем моря, экспозиция и характер склонов. Так, на выровненных участках и северных склонах продолжительность залегания снега и высота снежного покрова увеличиваются, тогда как на крутых южных и юго-восточных склонах, сплошной снежный покров в течение зимы отсутствует. Во время снегопадов эти склоны покрываются снегом, но постоянные сильные ветры, дующие сразу после снегопадов, оголяют их и способствуют накоплению снега на пониженных элементах рельефа. На положительных элементах рельефа оставшаяся часть снега испаряется под действием солнечной радиации (Харламов, 1981).

В горноледниковом бассейне Актру наблюдения за высотой снежного покрова сотрудниками лаборатории динамики и устойчивости экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН были начаты в марте 2003 г., продолжены А.Ю. Бочаровым в 2012-2017 гг. (Бочаров, 2013) и сотрудником горного центра «Алтай-Актру» Н.Г. Малаховым – в 2018-2022 гг. Снегомерные съемки проводились с помощью переносной рейки на четырех постоянных модельных участках, два из которых расположены на флювиогляциальных отложениях на днище долины р. Актру – в молодом лиственничнике и на открытых галечниковых отложениях на высоте 2150 м над ур. м.; один – в старовозрастном кедровом ерниково-зеленомошно-лишайниковом лесу у подножья фронтальной морены ледника Малый Актру на высоте 2200 м над ур. м. и еще один – на моренном комплексе ледника Малый Актру, на участке, освободившемся ото льда в 1936-1941 гг., на высоте 2220-2240 м над ур. м. Основные серии наблюдений

велись на открытых участках, в лесах – на открытых ерниковых участках, редирах (сомкнутость крон 0,1-0,2), и в негустых участках (сомкнутость крон 0,3 и выше).

В период наблюдений средняя мощность снежного покрова на флювиогляциальных отложениях и молодых моренах была близка и составляла 71-76 см, однако для морен характерен большой разброс значений – от 12 до 135 см, обусловленный сложностью мезорельефа морен. Так, для моренных холмов и валов, снег с которых постоянно сдувается на протяжении всей зимы, характерна небольшая мощность снежного покрова (около 15-20 см), максимальная мощность (120-130 см) отмечалась в понижениях у оснований моренных валов, для остальной части участков между моренными валами мощность составляла 60-80 см. При этом наибольшие межгодовые различия мощности снежного покрова наблюдались на открытых участках, но практически отсутствовали на мезоповышениях и у их оснований.

На обширных открытых поверхностях флювиогляциальных отложений снежный покров более однороден, однако его мощность так же определяется рельефом: на гривках, откуда снег легче сдувается, мощность снежного покрова на 20-30 см меньше, чем на более пологих, обширных открытых участках. На открытых участках глубина снежного покрова в разные годы составляла от 61 до 98 см, на повышениях рельефа – от 53 до 65 см. Для открытых участков молодых лиственничных лесов на флювиогляциальных отложениях характерна примерна такая же средняя мощность снежного покрова, что и для галечников; в разные годы она оставляла от 43 до 94 см.

Для разреженного участка обследованного старовозрастного кедрового леса характерна меньшая мощность снежного покрова: ее среднее значение за период наблюдений составило 62 см, то есть примерно 4/5 от среднего для морен и флювиогляциальных отложений. Здесь мощность снежного покрова определялась в основном сомкнутостью крон. На почти полностью открытых ерниковых участках мощность снежного покрова варьировала от 100 до 120 см, однако в местах с несколько большей сомкнутостью крон (0,1-0,2) падала до 50-88 см. На участках с большей сомкнутостью крон (0,3 и выше) этот показатель снижается и варьирует от 14 до 65 см, в среднем составляя 51 см.

Результаты проведенных наблюдений хорошо согласуются с данными исследований, проведенных в 2004-2011 гг. с целью изучения возможности фитоиндикации сезонной гляциосферы (Лукьянова, Тимошок, 2013). Следует так же отметить, что в годы наблюдений в высокогорном бассейне Актру временный снежный покров нередко формировался уже в августе и, практически ежегодно – в сентябре и первой половине октября; продолжительность его существования колеблется от 2 до 7-10 дней. С наступлением во второй-третьей декаде октября устойчивых отрицательных температур устанавливается постоянный снежный покров.

Таким образом, мощность снежного покрова определяется особенностями рельефа: она невысока на склонах долины, для которых типично сдувание снега, и максимальна на дне долины – на моренах и флювиогляциальных отложениях. Характер распределения снега в экотопах определяется мезорельефом и характером фитоценозов: на мезоповышениях мощность снежного покрова существенно меньше, чем на ровных участках из-за сдувания снега, при этом на открытых кустарниковых участках старовозрастных лесов и редирах она значительно выше, чем в лесах с высокой сомкнутостью крон.

Как показали наши исследования невысокая (15-20 см) мощность снега на моренных валах, является одним из факторов, создающих режим постоянных нарушений в этих экотопах сильно замедляющий сукцессию. В остальных изученных экотопах молодых морен и флювиогляциальных отложений мощность снежного покрова достаточна для нормального развития и функционирования фитоценозов.

1. Бочаров А.Ю. Распределение снега в верхней части лесного пояса горно-ледникового бассейна Актру (Центральный Алтай) // Десятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск, 2013. С. 29-31.
2. Галахов В.П., Нарожный Ю.К., Никитин С.А., Окишев П.А., Севастьянов В.В. и др. Ледники Актру (Алтай). Л.: Гидрометеиздат, 1987. 118 с.
3. Горчаковский П.Л., Шиятов С.Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. М.: Наука, 1985. С. 60-75.
4. Дмитриев В.Е., Гуреева И.И., Танзыбаев М.Г. и др. Роль снежного покрова в формировании пространственно-временных особенностей биоценозов. // Сезонная ритмика природы горных областей. Л., 1982. С. 17-19.
5. Лукьянова Н.А., Тимошок Е.Н. Возможности фитоиндикации сезонной гляцио-сферы в горно-ледниковом бассейне Актру (Северо-Чуйский хребет, Центральный Алтай) // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 370. С. 156-160.
6. Мартынова А.М. Пространственное распределение снежного покрова как индикатор дифференциации горнотаежных ландшафтов хребта Мяо-Чан // Стационарные гидрологические исследования на юге Дальнего Востока. Владивосток, 1979. С.140-154.
7. Самойлова Г.С. Ландшафтно-индикационная карта снежного покрова Алтае-Саянской физико-географической страны, как основа прогноза лавинной опасности // География и природные ресурсы. 1980. № 1. С. 152-154.
8. Степановских А.С. Экология. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 703 с.
9. Тронов М.В. Ледники и климат. Л.: ГИМИЗ, 1966. 408 с.
10. Харламов Нивально-гляциальный период 1977-1978 гг. в бассейне Актру // Гляциология Сибири. 1981. Вып. 1 (16). С.142-158.
11. Яшина А.В. Влияние снежного покрова на структуру высотной поясности Большого Кавказа // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1981. № 3. С. 117-126.
12. Global Outlook for Ice and Snow: Highlights. United Nations Environment Programme, 2007. Available at: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/13698> [Accessed: Aug. 30, 2023].
13. Hagedorn F., Shiyatov S.G., Mazepa V., Devi N.M., Grigor'ev A.A. et al. Treeline advances along the urals mountain range – driven by improved winter conditions? // Global Change Biology. 2014. Vol. 20. № 11. P. 3530-3543.

## ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ НАЗЕМНЫХ БИОТОПОВ ТОРЕЙСКИХ ОЗЕР ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

*Ткачук Т.Е.<sup>1,2</sup>, Зайцев И.С.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Государственный природный заповедник «Даурский», Забайкальский край, с. Нижний Цасучей, tetkachuk@yandex.ru

<sup>2</sup>Забайкальский государственный университет, г. Чита

Торейские озера представляют собой систему из двух крупнейших по площади в Восточном Забайкалье, озер – Зун-Торей и Барун-Торей. Их наиболее примечательной гидрологической особенностью этих содовых озер является их пульсирующий характер. Вслед за климатическими циклами, захватывающими весь Даурский экорегион в широком понимании, эти озера наполняются и пересыхают с периодичностью в среднем около 30 лет. Торейские озера играют огромную роль в поддержании биоразнообразия не только Даурии, но и всей Сибири, давая приют миллионам птиц – и гнездящихся здесь, и останавливающимся на пролете. Однако, и в сухом состоянии Торейские озера поддерживают популяции ряда видов животных и растений, создавая для них более благоприятные условия, чем в многоводный период. К таким видам относятся, например, жаворонки, некоторые грызуны, из растений – селитрянка сибирская, кермек золотой, астрагал светло-красный, Ковыль Клеменца, занесенные в Красную книгу Забайкальского края. Актуальности изучению развития наземных биотопов Торейских озер придает риск снижения или прекращения стока р. Ульдза – основного источника питания Торейских озер, – в связи с проектом строительства плотины в ее среднем течении на территории Монголии.

Задачей настоящего исследования является проследить динамику наземных биотопов, формирующихся на сухом дне Торейских озер в разные периоды их гидрологического цикла. Динамика и фитоценотическое разнообразие биотопов Торейских озер изучаются нами на протяжении ряда лет, с 2002 г., главным образом на мониторинговых трансектах, где периодически проводится полевое переобследование растительности [1–6]. Полевые исследования показали, что при сокращении площади Торейских озер динамика растительности осушенного дна представляет собой сукцессию, а пространственная структура растительности – серию в целом концентрических полос фитоценозов, находящихся на разных стадиях сукцессии.

Опираясь на многолетние полевые данные, мы получили возможность выяснить динамику площадей различных биотопов на всем высохшем дне. Исследования проводились на основе дешифрирования космоснимков. Использовали снимки Landsat- 4, 5, 7, 8, сцену 126025 за 1987–2021 гг., т.е. за 33 года. Для анализа биотопов использовали снимки за август-сентябрь, т.к. в этот период растительность максимально развита и лучше всего поддается дешифрированию – как экспертному, так и автоматическому. В тех случаях, когда за август-сентябрь не было безоблачных или малооблачных снимков, использовали снимки за июль или начало октября. Подготовка к работе и анализ космоснимков проводились программными средствами QGIS 3.10.5 и ArcGIS 10.8. При наличии небольшого количества облаков (до 15%) их вырезали при помощи маски облачности, создаваемой вручную. Определение площадей наземных биотопов проводили путем автоматической классификации с обучением. Результат автоматической классификации подвергался экспертной проверке, при необходимости проводилось уточнение алгоритма. Процедура классификации включала от 1 до 10 итераций в зависимости от состояния растительного покрова и водных объектов; в разные годы было выделено от 6 до 12 классов биотопов. Статистическая и графическая обработка данных проводилась в программе Microsoft Excel.

Начало предпоследнего влажного периода озер Торейской котловины приходится на 1984 г. Период 1987–2021 гг. представляет собой почти полный гидрологический цикл Торейских озер, в течение которого максимум озер пришелся на 1999 год. В последний гидрологический цикл наблюдалось полное пересыхание обоих озер, но процесс пересыхания происходит несинхронно: Барун-Торей достиг полного высыхания на девять лет раньше Зун-Торей; наполнение его так же начинается раньше. Поэтому динамику наземных биотопов мы рассматривали на примере оз. Барун-Торей. В начале засушливого климатического периода площадь озер уменьшалась медленно: Барун-Торей до 2004 года, Зун-Торей до 2015 года, после чего процесс ускорился, что привело к образованию больших площадей солончаков. После полного пересыхания Торейских озер в последний цикл их наполнение происходит очень неравномерно во времени. Сначала происходит небольшое и нестабильное наполнение за счет осадков, затем – более существенное наполнение за счет паводков на р. Ульдаза.

Изменения площадей биотопов на дне и побережье оз. Барун-Торей показаны на рисунке. Многолетняя фаза предыдущего тридцатилетнего цикла была нами рассмотрена почти на всем ее протяжении – за период с 1987 по 2005 гг. Эта фаза характеризуется сравнительно малой площадью всех наземных биотопов на побережье Торейских озер. В многолетний период заметную роль в растительности побережья играют сырые и заболоченные луга с доминированием кочкарных осок (*Carex schmidtii*), вейников (*Calamagrostis* spp.), реже – густые заросли ячменя (*Hordeum brevisubulatum*), заросли тростника южного (*Phragmites australis*) как на берегу, так и на мелководье; площади этих биотопов остаются приблизительно постоянными. С 2005 года заметные площади названные биотопы претерпевают сильные преобразования: исчезают заросли тростников на мелководьях, сокращаются, а затем исчезают тростниковые заросли на берегах, сильно сокращаются площади сырых лугов. Следует заметить, что по мере высыхания озер и снижения уровня грунтовых вод заросли тростника уменьшаются в высоте и густоте и на космоснимках начинают выглядеть подобно сырým (осоковым, вейниковым и др.) лугам. Поэтому при дешифрировании они попадают в эту категорию.

В период падения уровня воды и сокращения площади озера обсыхают новые участки дна. Эти площади в первые годы представляют собой мокрые, затем – сухие солончаки, которые постепенно зарастают галофитным однолетником из семейства маревых – *Suaeda corniculata*. Максимальные площади заросли сведы занимают при минимальной площади Барун-Торей. Следующей стадией сукцессии являются бескильницевые (*Puccinellia tenuiflora*) луга, далее – бескильницево-разнотравные, ячменные луга. Различение их на космоснимках не представляется возможным, и они дешифрируются как единый класс – галофитные луга на дне озера. В фазу низкого уровня озер площадь этого класса постепенно растет за счет сукцессионного развития предыдущей стадии развития лугов – сведовых.

Часть лугов по периферии дна и на участках, бывших берегами при максимальном уровне, преобразуются в ходе сукцессии в остепненные луга с доминированием *Leymus chinensis*, *Artemisia commutata*, *A. scoparia*, *A. mongolica*, *Cleistogenes squarrosa*. Рост площади остепненных лугов виден на рисунке. Полевые исследования показывают, что скорость остепнения, т.е. внедрения в состав растительных сообществ ксерофитных видов, растет с течением времени.

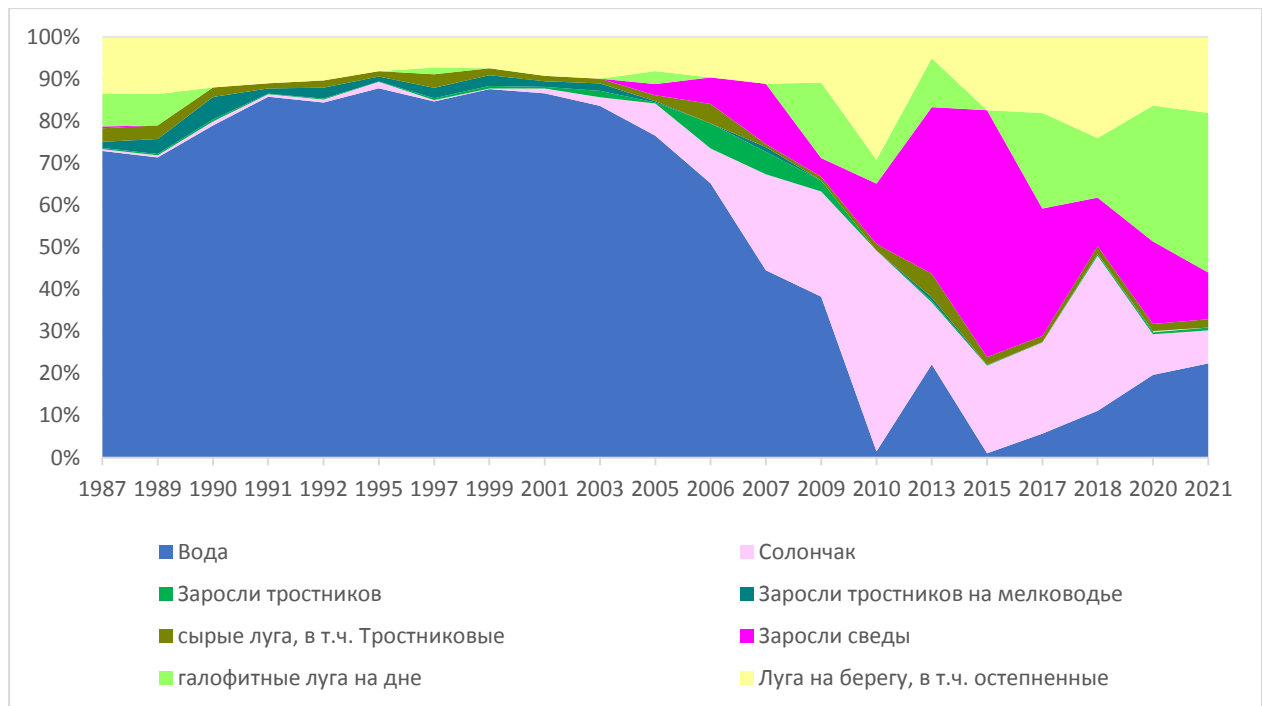


Рисунок 1. Динамика площадей биотопов на дне и побережье оз. Барун-Торей

В целом динамика площадей наземных биотопов оз. Барун-Торей очень явно коррелирует с гидрологическими фазами и демонстрирует четкие тенденции: преобладания влажных биотопов в период высокого уровня воды, сокращение и исчезновение их в период падения уровня; расширение засушливых биотопов в период падения и низкого уровня. Удлинение продолжительности маловодной и безводной фазы в гидрологическом цикле озер при возможном завершении строительства плотины на р.Ульдза вызовет продолжение этих тенденций: деградация и исчезновение наиболее продуктивных местообитаний: высокой растительности (ивняки, тростниковые заросли) и сырых лугов на более длительный срок, чем в норме; удлинение периода восстановления указанных типов местообитаний; зарастание дна галофитнолуговой растительностью (бескильницевые и ячменные луга) с последующим ее остепнением, возможно, вплоть до степной растительности на дне озер.

1. Горюнова С.В., Сараева Л.И., Ткачук Т.Е. Создание сети и многолетней программы мониторинга растительности трансграничного Даурского экорегиона в связи с климатическими изменениями. // Социально-эколого-экономические проблемы развития приграничных регионов России-Китая-Монголии / Материалы научно-практической конференции. Чита: «Экспресс-издательство», 2010. С. 28-30.

2. Кириллюк В.Е., Ткачук Т.Е., Кириллюк О.К. Влияние изменений климата на местообитания и биоту в Даурии // Проблемы адаптации к изменению климата в бассейнах рек Даурии. Труды Государственного природного биосферного заповедника «Даурский». Вып. 5. Чита: Экспресс-издательство, 2012. С. 46-62.

3. Ткачук Т.Е. Основные черты динамики растительности в Даурском экорегионе в засушливую фазу климатического цикла // Academician Leo Berg – 140 years: Collection of Scientific Articles = Академику Л.С. Бергу – 140 лет: Сб. науч. статей. – Bendery: EcosTIRAS, 2021 – P. 230-233.

4. Ткачук Т.Е., Жукова О.В. Результаты мониторинга растительности на стационарном геоботаническом профиле в Даурском заповеднике. // Природоохранное сотру-



ничество Забайкальского края (Россия), Автономного района Внутренняя Монголия (Китай) и Восточного аймака (Монголия) в трансграничных экологических регионах. - Чита: Экспресс-издательство, 2010. с. 299-302.

5. Kirilyuk V.E., Obyazov V.A., Tkachuk T.E., Kirilyuk O.K. Influence of climate change on wildlife in the Daurian ecoregion // *Eurasian Steppes --- Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World*" edited by Marinus J.A. Werger & Marja A. Van Staalduinen. Published by Springer, (Dordrecht, Berlin, Tokyo, Boston, London), 2012 – 400-470 p.

6. Tkachuk T.E., Pazdnikova N.M., Kozlova V.N., Saraeva L.I., Goryunova S.V. Dynamics of Riparian Vegetation of Steppe Lakes in the Dauria // *Proceedings of the International Conference of China-Mongolia-Russia Dauria International Protected Area*. Ulaanbaatar: Wildlife Conservation Society, 2014. P. 52-56.

## ДИНАМИКА И СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОГОРНЫХ ЛЕСОВ И ЛЕСОТУНДРОВОГО ЭКОТОНА НА КАТУНСКОМ ХРЕБТЕ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

Филимонова Е.О., Савчук Д.А., Тимошок Е.Е., Николаева С.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
smelena82@mail.ru

Описано состояние высокогорных лесов и лесотундрового экотона в условиях Катунского хребта в горно-ледниковом бассейне Аккем. Рассмотрена динамика заселения экотона, изменение плотности деревьев и подроста на двух склонах долины и на разных высотах, проведена оценка жизненного состояния подроста.

Высокогорные леса и насаждения в лесотундровом экотоне, представляющим собой полосу между сомкнутыми лесами и тундрой, чутко реагируют на изменения климата (Горчаковский, Шиятов 1985; Holtmeier, 2003 и др.).

В горах Алтая описана возрастная структура высокогорных насаждений на Северо-Чуйском хребте (Тимошок и др., 2009; Тимошок и др., 2015), проведена оценка состояния подроста на Семинском (Пац и др., 2012) и Южно-Чуйском (Филимонова, Диркс, 2015) хребтах.

Цель работы – охарактеризовать состояние и описать динамику высокогорных лесов и лесотундрового экотона в ороклиматических условиях Катунского хребта.

Район исследований расположен в верховьях р. Аккем в наиболее высокой части Катунского хребта, который является главным центром развития современного оледенения на Алтае. Исследования проводились на склонах долины р. Аккем в районе Аккемского озера. Западный склон долины является более влажным, восточный – сухим.

Для оценки состояния и динамики высокогорных лесов и лесотундрового экотона на восточном и западном склонах долины р. Аккем были заложены 4 высотных профиля, проходящие от границы сомкнутых лесов кедра сибирского (*Pinus sibirica*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) до одиночных деревьев и подроста в лесотундровом экотоне. В пределах высотных профилей заложено 15 пробных площадей (ПП) на высотах 2065-2370 м над ур. м. размером 20х40 м. На каждой ПП проведен сплошной пересчет взрослых деревьев и подроста (359 и 267 экз. соответственно). Для определения возраста у деревьев взяты керны, у подроста возраст определяли по годичным приростам и спилам. К подросту отнесены молодые особи, не достигшие высоты 1.5 м и возраста 50 лет. По высоте подрост разделен на мелкий (до 0,5 м), средний (0,5-1 м) и крупный (1-1,5 м). Для подроста выделены 3 уровня жизненности: жизнеспособный, угнетенный и погибший (Злобин, 1985).

Как показали проведенные исследования, в нижней части склонов долины р. Аккем на высотах 2065-2240 м над ур. м. произрастают сплошные кедровые и лиственнично-кедровые леса. Отмечены сомкнутые леса, которые имеют сомкнутость древесного яруса 0,6-0,7 и плотность деревьев 343-850 экз./га и разреженные – 0,3-0,5 и 216-275 экз./га соответственно.

На восточном склоне в древесном ярусе лесов выделено 2 возрастных поколения кедра и лиственницы (рис. 1А-а). Средний возраст деревьев кедра в первом поколении составил 346 лет, лиственницы – 286 лет; во втором более молодом поколении – 82 года и 129 лет соответственно. Плотность деревьев в лесах на этом склоне колеблется от 343 до 850 экз./га.

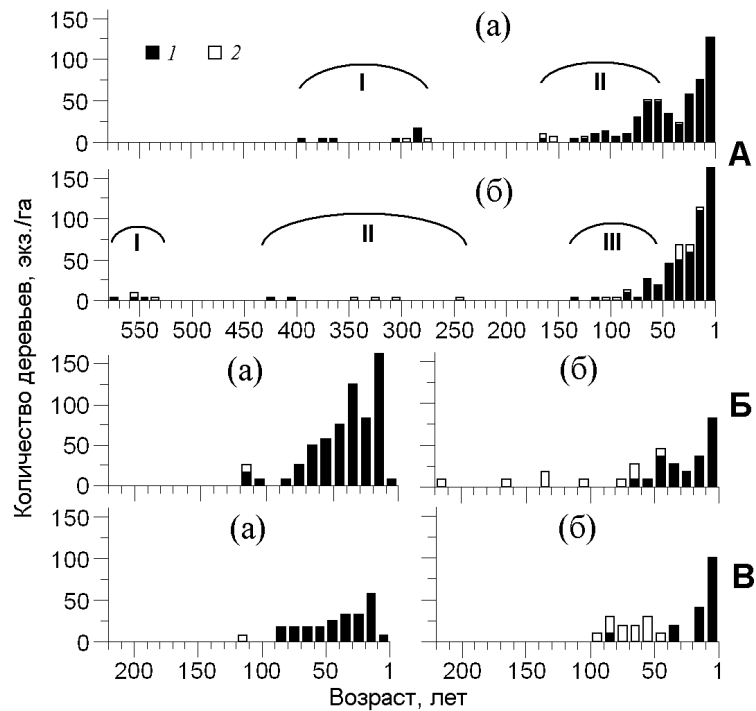


Рисунок 1. Распределение по возрасту деревьев кедра (1) и лиственницы (2) в лесах (А), группах (Б) и среди одиночных деревьев (В) на восточном (а) и западном (б) склонах в верховьях р. Аккем (Катунский хребет, Горный Алтай). Дугами и римскими цифрами обозначены возрастные поколения.

Во всех обследованных здесь лесных сообществах в ярусе подроста отмечен только кедр. Пик его заселения на обоих склонах приходится на последние два десятилетия (рис.1А). Плотность молодых особей в лесах на высотах 2065-2070 м над ур. М. составляет 625-1300 экз./га, с увеличением абсолютной высоты отмечено снижение этого показателя более чем в 2 раза: на высоте 2220-2240 м – 325-575 экз./га. Подрост кедра имеет средний возраст 16 лет, с колебаниями от 1 до 50 лет. Он преимущественно жизнеспособный (66-74%), но в самом сомкнутом фрагменте леса на высоте 2220 м над ур. М. подрост большей частью угнетен (67%), что связано с высокой сомкнутостью древесного яруса. По высоте доминирует мелкий подрост, на его долю приходится 67-85%.

На более влажном западном склоне в древесном ярусе лесов сформировано 3 возрастных поколения кедра и лиственницы (рис.1А-б). В первом поколении средний возраст кедра достигает 559 лет, лиственницы – 542 года; во втором – 415 и 308 лет соответственно; в третьем – средний возраст кедра составляет 81 год и лиственницы 97 лет. Плотность деревьев в лесах на этом склоне ниже, чем на восточном и составляет 216-275 экз./га.

Среди молодых особей кроме кедра отмечена лиственница, но ее участие незначительно (менее 5%). Возраст подроста кедра варьирует от 2 до 46 лет (средний возраст 15 лет). Единичные особи лиственницы имеют возраст от 18 до 35 лет. Плотность подроста кедра здесь достигает 767-850 экз./га. Молодые особи кедра преимущественно жизнеспособные (70-80%). Как и на восточном склоне здесь преобладает мелкий подрост (74-85%).

Лесотундровый экотон проходит широкой полосой на высотах 2190-2370 м над ур. М., где деревья кедра и лиственницы произрастают кулисами, плотными и разреженными группами, а также одиночно. Группы деревьев в экотоне сформированы особями кедра и лиственницы более молодого возраста, чем в лесах.

На восточном склоне в группах деревьев среди взрослых особей и подроста доминирует кедр. Его средний возраст в древесном ярусе в группах составляет 71 год. В разреженных группах плотность взрослых особей кедра не превышает 125 экз./га, в плотных группах плотность значительно выше – 507 экз./га. Средний возраст подроста кедра составляет 22 года, с колебаниями от 11 до 45 лет, плотность варьирует от 350 до 767 экз./га. На долю жизнеспособного подроста приходится 50-67%. Здесь, как и в лесах на обоих склонах, большая часть молодых особей кедра имеют высоту до 0,5 м (мелкий подрост).

На влажном западном склоне отмечены разреженные группы деревьев с преобладанием лиственницы во взрослом поколении, участие кедра снижается до 5-30%. Средний возраст деревьев лиственницы (110 лет) здесь почти в 2 раза выше, чем кедра (60 лет). Плотность взрослых деревьев колеблется от 300 до 433 экз./га. Подрост здесь представлен лишь особями кедра, как и на восточном склоне. Его плотность (600-750 экз./га) почти в 2 раза больше, чем плотность взрослого поколения. Возраст молодых особей кедра составляет 28 лет (варьируя от 5 до 50 лет). Преобладает мелкий жизнеспособный (67%) подрост.

В лесотундровом экотоне выше групп деревьев произрастают отдельно стоящие деревья кедра и лиственницы. Среди одиночных деревьев на восточном склоне преобладает кедр, на западном – лиственница. На восточном склоне отдельные деревья поднимаются до высоты 2370 м, на западном граница снижена до 2290 м над ур.м. из-за влияния оползневых и осыпных процессов. Плотность деревьев на обоих склонах низкая (33–125 экз./га). Средний возраст обеих пород в древесном ярусе составляет 70-90 лет. Подрост, который представлен только кедром, имеет низкую плотность на восточном склоне (100-150 экз./га), а на западном в 2 раза выше – 200-350 экз./га. Подрост лиственницы на обоих склонах отсутствует. Молодое поколение кедра на восточном склоне представлено особями от 7 до 38 лет (средний возраст 21 год), на западном – от 3 до 40 (средний возраст 12 лет). Здесь в верхней части экотона доля жизнеспособного подроста уменьшается до 50-60% на восточном склоне и до 36-56% – на западном.

Появление первых деревьев лиственницы в экотоне на восточном склоне произошло около 120 (рис.1Б-а), на западном – 230 лет назад (рис.1Б-б), заселение кедра – 120 и 90 лет назад соответственно. Возраст взрослых особей кедра и лиственницы в лесотундровом экотоне Катунского хребта варьирует в основном от 50 до 120 лет, деревья более старшего возраста единичны. Схожая картина наблюдается в лесотундровом экотоне Северо-Чуйского хребта, где насаждения представлены деревьями 60-150 лет с единичным участием особей старших возрастов (Тимошок и др., 2022).

Проведенные исследования показали, что наиболее активное заселение деревьев в лесотундровом экотоне Катунского хребта с 1980-х гг. соответствует периоду современного потепления климата, который инструментально зафиксирован на Алтае (Изменение климата..., 2011). При анализе возрастной структуры насаждений выявлено, что на восточном склоне происходило постепенное увеличение плотности деревьев с 1930 г, а затем резкий спад плотности подроста после 2010 г. (рис.1Б-а, 1В-а), тогда как на западном склоне с 2010 г. произошло повышение этого показателя (рис.1Б-б, 1В-б). Снижение плотности подроста в этот период вероятно связано с малоснежными холодными зимами в 2011, 2012, 2014 гг.

Таким образом, в условиях Катунского хребта на склонах долины р. Аккем верхняя граница кедровых и лиственнично-кедровых лесов проходит на высоте 2200-2250 над ур.м. Древесный ярус в лесах представлен 2-3 поколениями. Граница групп деревьев проходит на высоте 2265-2330 м, отдельные взрослые деревья кедра и лиственницы поднимаются до высоты 2370 м (подрост до 2440 м) на восточном склоне и до 2290 м на западном. На снижение границ распространения деревьев на влажном склоне влияют

оползневые процессы. Заселение экотона первыми единичными деревьями происходило на восточном склоне 120 лет назад, на западном – 230 лет. Доминирующей породой в группах деревьев и среди одиночных особей на восточном склоне является кедр, на западном – лиственница. Среди подроста на всей обследованной территории абсолютно преобладает кедр, который преимущественно характеризуется как жизнеспособный. Молодые особи кедра наиболее активно заселялись с 1980 г. – в период современного потепления климата.

Исследование было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание ИМКЭС СО РАН, регистрационный номер проекта 121031300226-5, FWRG–2021–0003).

1. Горчаковский П.Л., Шиятов С.Г. Фитоиндикация условий среды и природных процессов в высокогорьях. М.: Наука, 1985. 209 с.

2. Злобин Ю.А. Об уровнях жизнеспособности растений // Бот. журн. 1985. Т. 46, № 4. С. 492-505.

3. Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: Оценочный доклад. М.: WWF России, 2011. 168 с.

4. Пац Е.Н., Чернова Н. А., Скороходов С.Н. Естественное возобновление кедра в верхней части лесного пояса на Семинском хребте (Центральный Алтай) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 1(17). С. 130-141.

5. Тимошок Е.Е., Филимонова Е.О., Пропастилова О.Ю. Структура и формирование древостоев хвойных в экотоне верхней границы древесной растительности Северо-Чуйского хребта (Центральный Алтай) // Экология, 2009, №3, С. 187-194.

6. Тимошок Е.Е., Савчук Д.А., Николаева С.А., Тимошок Е.Н., Филимонова Е.О. Современное состояние верхней границы леса в ороклиматических условиях Северо-Чуйского хребта (Центральный Алтай) // Проблемы региональной экологии. 2015. № 4. С. 6-9.

7. Тимошок Е.Е., Николаева С.А., Тимошок Е.Н., Савчук Д.А., Филимонова Е.О., Райская Ю.Г., Скороходов С.Н., Белова М.Н., Бочаров А.Ю. Экологический мониторинг автотрофного блока наземных экосистем в Северо-Чуйском центре оледенения (Центральный Алтай) // Сибирский экологический журнал. 2022. Т. 29. № 3. С. 249-262.

8. Филимонова Е.О., Диркс М.Н. Естественное возобновление *Pinus sibirica* Du Tour и *Larix sibirica* Ledeb. на верхнем пределе произрастания на Южно-Чуйском хребте (Горный Алтай) // Проблемы изучения растительного покрова Сибири: Матер. V Межд. науч. конф., посвящ. 130-летию Гербария им. П.Н. Крылова и 135-летию Сиб. ботан. сада Томск. гос. ун-та. Томск: Издат. дом Томск. гос. ун-та, 2015. С. 225-229.

9. Holtmeier F.-K. Mountain timberlines. Ecology, patchiness, and dynamics. Advances in Global Change Research 14. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2003. 369 p.

## ОЦЕНКА ПОСТПИРОГЕННОЙ ДИНАМИКИ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БОЛОТ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ НА МИКРОУРОВНЕ

*Харанжевская Ю.А., Синюткина А.А.*

Сибирский НИИ сельского хозяйства и торфа, г. Томск, kharan@yandex.ru,  
ankalaeva@yandex.ru

Природные пожары являются одной из глобальных экологических проблем, а современные климатические изменения увеличивают продолжительность и тяжесть пожароопасного периода. Поэтому отмечается увеличение частоты и интенсивности природных пожаров, а болота становятся более уязвимы для природных пожаров [1-4]. Зачастую степень выгорания поверхности болота носит весьма неоднородный характер, во многом зависит от микрорельефа поверхности болота и в конечном итоге оказывает влияние на химический состав болотных вод пирогенных участков. Поэтому целью данной работы является оценка постпирогенной динамики гидрохимических показателей болот на микроуровне.

Исследования проводились в пределах 3 ключевых участков болот (Васюганское болото, Усть-Бакчарское болото и плоскобугристое болото в районе с. Пангоды), расположенных в лесотундровой и таежной зоне Западной Сибири, выгоревших в 2014-2016 гг. Для оценки пространственной неоднородности гидрохимических показателей болот на внутрифациальном уровне в болотных водах было проведено измерение температуры, pH, ОВП, электропроводности, концентрации  $O_2$  и  $CO_2$  на модельной площадке 5x5 м методом конверта (в 9 точках) в слое 0-50 см и 0-100 см с привязкой к высоте микрорельефа и степени выгорания поверхности. Определение растворенного  $O_2$  в болотных водах проводилось с использованием оксиметра HI 9146-04 фирмы HANNA Instruments (Германия). Величину pH измеряли с помощью полевого прибора pH-200 фирмы HM Digital (Южная Корея), окислительно-восстановительный потенциал (Eh) определяли ORP-200 фирмы HM Digital (Южная Корея). Электропроводность (ЕС) болотных вод измеряли с применением кондуктометра HI 8733 фирмы HANNA Instruments (Германия). Всего в пределах Бакчарского болота было выполнено обследование 5 постпирогенных и 1 фоновой площадки, на Усть-Бакчарском болоте и плоскобугристом болоте у с. Пангоды – 2 постпирогенных и 1 фоновой площадки.

Анализ результатов показал, что в естественных условиях на фоновой площадке Бакчарского болота гидрохимические показатели плавно снижаются от кочки к мочажине, в пробах вод, отобранных в кочках, отмечается более высокое содержание  $CO_2$  (74,1 мг/л),  $O_2$  (3,72 мг/л), величина pH (4,60), ОВП (231), температура (14,6 °С) и наблюдается наибольшее снижение уровня болотных вод (-37 см). В мочажинах фонового участка (Вфон) отмечается минимальное содержание  $CO_2$  (58,3 мг/л),  $O_2$  (0,88 мг/л), величина pH (4,42), ОВП (226) и температура (12,9 °С), и наоборот повышается ЕС (112). В условиях пирогенной трансформации мочажины Бакчарского болота более подвержены пожару, в итоге в пробах, отобранных в понижениях микрорельефа (средняя поверхность и мочажины) отмечается повышение  $CO_2$  в среднем до 84,5-121 мг/л, величины pH до 4,68. В кочках в условиях их меньшей трансформации под влиянием пожара сохраняется более высокий ОВП (235 мВ), температура (19,5 °С) и содержание  $O_2$  (3,03 мг/л) в водах, и наоборот в мочажинах отмечается снижение ОВП (156-176 мВ),  $O_2$  (1,42-1,47 мг/л) и температуры (17,6 °С) за счет существования горелого слоя на поверхности. Следует отметить, несколько отличную тенденцию для ЕС вод. Повышение ЕС вод на

пирогенных участках отмечается на кочках и в среднем составляет 119  $\mu\text{S}/\text{см}$ , а в понижениях микрорельефа (средняя поверхность и мочажины) величина ЕС снижается до 109  $\mu\text{S}/\text{см}$ .

Существенное снижение уровней вод и более значимая трансформация поверхности Усть-Бакчарского болота в результате осушения способствовала тому, что на фоновой площадке в отличие от Бакчарского болота повышение концентраций  $\text{CO}_2$  (147 мг/л) и  $\text{O}_2$  (3,50 мг/л) отмечается в понижениях. И аналогично Бакчарскому болоту в кочках относительно других элементов микрорельефа отмечается более высокие величины pH вод (4,42), ОВП (271 мВ), ЕС (111  $\mu\text{S}/\text{см}$ ), а в понижениях они немного снижаются. На площадках Усть-Бакчарского болота под влиянием пирогенного фактора отмечается снижение содержания  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в 1,3-2 раза, увеличение pH до 4,62-4,69, незначительное снижение ОВП вод (231 мВ) относительно фона и повышение ЕС до 116  $\mu\text{S}/\text{см}$ . Влияние микрорельефа поверхности на исследуемые гидрохимические показатели выражается в более высоком содержании  $\text{CO}_2$  (111-116 мг/л) и ЕС (116-121  $\mu\text{S}/\text{см}$ ) в пробах, отобранных в кочках и на уровне средней поверхности (СП). Также на уровне СП отмечаются более высокое содержание  $\text{O}_2$  (1,94 мг/л), величина ОВП (238 мВ), pH (4,71) и температура воды (20,9  $^{\circ}\text{C}$ ).

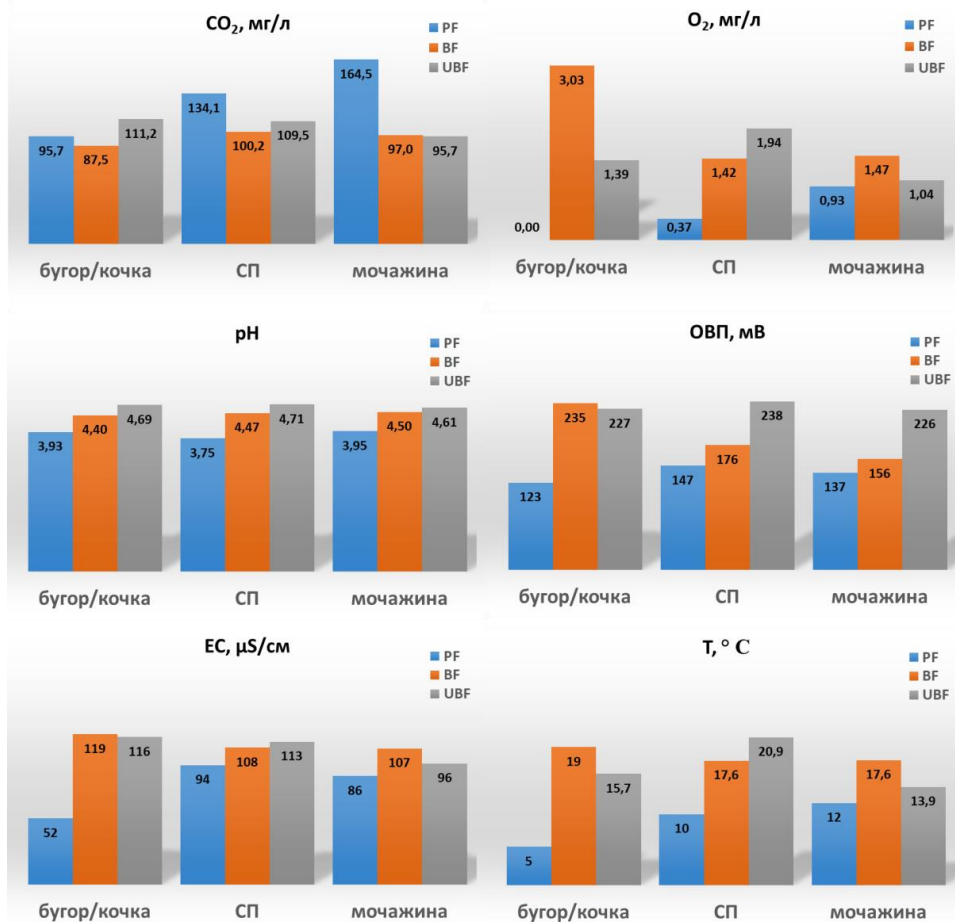


Рисунок 1. Динамика гидрохимических характеристик пирогенных участков болот в зависимости от микрорельефа поверхности (бугор/кочка, средняя поверхность, мочажина).

Анализ изменения гидрохимических характеристик площадок плоскобугристого болота у с. Пангоды в зависимости от микрорельефа поверхности показал некоторые различия. Так для фонового участка в пробах, отобранных на бугре в среднем отмечаются более высокие концентрации  $\text{CO}_2$  (165 мг/л),  $\text{O}_2$  (6,13), pH (3,70), средние величины ОВП сопоставимы на бугре и на уровне средней поверхности, а средняя величина ЕС достоверно не различается между элементами микрорельефа. В понижениях микрорельефа фонового участка  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и pH, ОВП снижаются в 1,1-5 раз. На пирогенных участках наоборот в понижениях микрорельефа отмечается повышение содержания  $\text{CO}_2$  (165 мг/л),  $\text{O}_2$  (0,93 мг/л), ОВП (137-147 мВ), ЕС (86-94  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) и температуры вод (10-11,6 °С). Тогда как на бугре отмечается снижение характеристик в 1.2-2 раза. А величина pH достоверно не различается по элементам микрорельефа. В целом под влиянием пирогенного фактора в водах плоскобугристого болота отмечается повышение в среднем в 1,2-1,7 раз содержания  $\text{CO}_2$  (245,3 мг/л), pH (4,32), ЕС (120  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) и температуры (14,1 °С) в сравнении с фоновым участком, и наоборот отмечается снижение концентрации  $\text{O}_2$  (0,18 мг/л) и ОВП (99 мВ) на пирогенных участках (рисунок 1).

Таким образом, исследования показали, что под влиянием пирогенного фактора в болотных водах отмечается снижение содержания  $\text{O}_2$ , величин ОВП, и наоборот отмечается повышение pH, ЕС,  $\text{CO}_2$  и температуры. На Бакчарском болоте в водах на кочках отмечается повышенное содержание  $\text{O}_2$ , ОВП и ЕС, температуры, тогда как в понижениях микрорельефа, в условиях большего выгорания мочажин, отмечается повышение pH и  $\text{CO}_2$ . На Усть-Бакчарском болоте в результате более значимой трансформации поверхности в результате осушения на уровне средней поверхности в водах отмечаются более высокие концентрации  $\text{O}_2$ , величины pH, ОВП, температуры, в кочках сохраняется высокое содержание  $\text{CO}_2$ . В условиях лесотундры повышенные концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и температуры отмечены в болотных водах в мочажинах, величины pH на кочках и в мочажинах, а ОВП и ЕС на уровне средней поверхности. Таким образом, постпирогенная трансформация гидрохимических показателей болот на микроуровне зависит от типа болотного массива, интенсивности осушения и степени выгорания поверхности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.

1. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C., and Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 2021, 50, pp. 1953–1974, <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>, 2021.

2. Ackley C., Tank S.E., Haynes K.M., Rezanezhad F., McCarter C., Quinton W.L. Coupled hydrological and geochemical impacts of wildfire in peatland-dominated regions of discontinuous permafrost. *Science of the Total Environment*, 2021, Volume 782, 15 August, 146841 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146841.

3. Feurdean A., Florescu G., Tantau I., Vanniere B., Diaconu A.-C., Pfeiffer M., Warren D., Hutchinson S. M., Gorina N., Gałka M., Kirpotin S. Recent fire regime in the southern boreal forests of western Siberia is unprecedented in the last five millennia. *Quaternary Science Reviews*, 2020, № 244. 106495. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106495.

4. Nelson, K., Thompson, D., Hopkinson, C., Petrone, R., & Chasmer, L. Peatland-fire interactions: A review of wildland fire feedbacks and interactions in Canadian boreal peatlands. *Science of The Total Environment*, 2021, 769, 145212. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.145212.



## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ВЫПАДЕНИЯ ЛЕТНИХ ОСАДКОВ И РАЗНОЙ ВЫСОТЫ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЕТЕРОТРОФНОГО ДЫХАНИЯ ПОЧВЫ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО-КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА**

*Хорошаев Д.А., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О.*

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Московская область, г. Пушкино, d.khoroshaev@pbcras.ru

Гетеротрофное дыхание (heterotrophic respiration, HR) представляет ту часть общего потока CO<sub>2</sub> из почвы, которая формируется в результате разложения почвенного органического вещества – основного резервуара углерода в наземных экосистемах. Таким образом, HR является расходной частью баланса углерода в наземных экосистемах и необходима для расчета нетто-экосистемной продукции и нетто-биомной продукции [2]. Актуальность точной оценки HR возрастает в связи увеличением глобальной температуры воздуха (T<sub>в</sub>), величина которой показывает беспрецедентные темпы роста [6]. Изменение характера выпадения осадков, смещение границ вегетационных периодов, увеличение повторяемости и силы экстремальных погодных явлений, которые являются характерной чертой наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений, оказывают сильное влияние на функционирование экосистем, что в конечном итоге приводит к изменению в них баланса углерода.

Температура и влажность почвы считаются наиболее значимыми факторами, которые определяют величину HR в экосистемах [3, 5]. Широко распространено убеждение, что увеличение глобальной температуры воздуха должно привести к усилению минерализации органического вещества почвы, которое обеспечит петлю положительной обратной связи за счет более интенсивного выделения CO<sub>2</sub> из почвы [7]. С другой стороны, изменение в характере выпадения осадков, которое в настоящее время выражается в увеличении продолжительности сухих периодов [1] может привести к снижению влажности почвы на отдельных временных отрезках. Не до конца ясно как взаимодействие между увеличением температуры и снижением влажности почвы влияет на величину HR [10] и какова роль продолжительности периодов без осадков в этом процессе. Потепление климата за пределами вегетационного периода может иметь важные последствия для годового баланса углерода в сезонно-заснеженных экосистемах [8]. Позднее формирование устойчивого снежного покрова, как и ухудшение его теплоизолирующих свойств может приводить к изменению температуры почвы, динамики ее промерзания и числа циклов заморзания–оттаивания почвенной влаги, которые будут серьезным образом влиять на функционирование экосистем [8].

Большинство натуральных экспериментов, которые ставят целью оценку влияния будущих изменений климата сосредоточено на изучении отдельных факторов и ограничены, как правило, тем или другим сезоном [9]. Цель представленного исследования заключалась в оценке совокупного влияния увеличения продолжительности засушливых периодов летом и изменения глубины снежного покрова зимой на величину температурной чувствительности HR, которая часто используется в климатических и экосистемных моделях. Для этого был заложен полевой имитационный эксперимент, задачи которого включали (1) определение внутри- и межгодовой изменчивости HR при имитации засушливых условий летом и изменения глубины снежного покрова зимой, (2) оценку температурной чувствительности HR при имитации различных погодных условий.

Полевой имитационный эксперимент проводился на опытных площадях Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Московская обл., г. Пушкино, 54°49'51.1"N37°36'18.4"E). Участок (~50 м<sup>2</sup>) с серой лесной среднесуглинистой

почвой (*Haplic Luvisol*) был поделен на 12 квадратных делянок с длиной стороны 1.8 м. Половина делянок была засеяна бобово-злаковой травосмесью. На оставшихся — поддерживался бессменный чистый пар. Луговые и парующие делянки чередовались в шахматном порядке. В настоящей работе представлен анализ влияния гидротермических условий на величину HR, которую определяли с поверхности почвы, лишенной растительного покрова.

Натурный имитационный эксперимент с контролем количества осадков летом и высоты снежного покрова зимой продолжался 2 года (2014-2016 гг.). *Первый вариант* характеризовал мягкие погодные условия (МУ), которые предполагали регулярный полив летом и дополнительное утепление почвы синтетическим материалом зимой. Укрытие площадок имитировало более ранний и высокий снежный покров, предотвращающий промерзание почвы. *Во втором варианте* оценивали усиление летней засушливости (ЗЛ), для чего проводили организацию двух коротких летних засух (~30-50 сут). В зимний период в варианте сохранялся естественный снежный покров. *Третий вариант* предполагал имитацию экстремальных погодных условий (ЭУ), которые включали имитацию длительного сухого периода летом (~90 сут) в совокупности с увеличенной глубиной промерзания почвы зимой, которая достигалась путем удаления снежного покрова.

Измерение дыхания почвы летом проводили динамическим камерным методом с помощью портативного инфракрасного газового анализатора LI-COR 6400XT (LI-COR, США). Камеру прибора располагали на стационарно врезанных на глубину 2-3 см почвенных основаниях диаметром 10 см. В морозный период измерение потока CO<sub>2</sub> проводили статическим камерным методом. В качестве камер использовали ПВХ трубы диаметром 11 см и высотой 45 см, которые врезались в почву на глубину 10 см. Три газовые пробы отбирали шприцами последовательно через 12-30 мин. Определение концентрации CO<sub>2</sub> в камерах-изоляторах проводили в лабораторных условиях на инфракрасном газовом анализаторе Li-820 (LI-COR, США). Скорость эмиссии CO<sub>2</sub> рассчитывали исходя из скорости накопления CO<sub>2</sub> в закрытой камере с учетом температуры, давления и снежного покрова.

Мониторинг температурного режима проводили с помощью автоматических логгеров DS1921G (Dallas semiconductor, США). Измерения объемной влажности почв в верхнем 6 см слое почвы проводили во время измерения скорости HR с помощью электронного влагомера (HH-2, ML2 ThetaProbe, Великобритания). В морозный период контролировали высоту снежного покрова. Расчёт коэффициента Q<sub>10</sub> для HR осуществляли на основе линейной зависимости логарифма этих величин от температуры почвы (T<sub>п</sub>):  $\ln(HR) = aT_{п} + b$ , где a и b – эмпирические константы. Величина Q<sub>10</sub> = e<sup>10a</sup> показывает во сколько раз увеличивается HR при увеличении T<sub>п</sub> на 10 °С.

Период исследований характеризовался погодными условиями, близкими к тем климатическим трендам, которые имеют место в регионе южного Подмосковья, а именно — засушливым летом и теплыми зимами, с повторяющимися оттепелями, циклами заморозания и оттаивания почв [4]. Летний гидротермический коэффициент Селянинова в 2014 и 2015 гг. составил 1.0 и 0.9 соответственно. Практически все месяцы морозных периодов 2014–2016 гг. характеризовались положительными аномалиями среднемесячных T<sub>в</sub>, которые составляли 1.2–5.5 °С. Следующий после окончания эксперимента период наблюдений, который пришелся на 2016–2017 гг., по температурным условиям был близок к климатической норме и характеризовался обильными осадками.

Суммарные месячные величины гетеротрофного дыхания почвы (total HR, THR) варьировали от 0.3 до 75 г C/(м<sup>2</sup> мес) в зависимости от варианта опыта и времени года. Годовые величины THR в вариантах МУ, ЗЛ и ЭУ составили соответственно 344-357, 318-319 и 242-253 мг C/(м<sup>2</sup> год). Хотя имитация коротких сухих периодов летом стимулировала HR, из-за зимнего промерзания почвы в данном варианте годовые величины

THR здесь были на 7–11% ниже, чем при имитации мягких погодных условий. Имитация экстремальных погодных явлений приводила к снижению годовых значений THR на 26–32%.

Коэффициент температурной чувствительности  $Q_{10}$  HR рассчитывали, используя месячные величины THR и усредненную  $T_n$  на глубине 1–10 см (рис. 1a). Величина  $Q_{10}$  зависела от имитируемого климата и увеличивалась от 1.44–1.68 в варианте МУ до 2.38–2.6 — в варианте ЭУ. Величина  $Q_{10}$  в большей степени зависела от зимней  $T_n$ , который определялся высотой снежного покрова (рис. 1b). Месячные величины THR при 0°C ( $HR_0$ ) изменялись от 7 до 22 г C/(м<sup>2</sup> мес) в зависимости от высоты снежного покрова. Величины  $HR_0$  как и  $Q_{10}$  были тесно линейно связаны со средней зимней  $T_n$  (рис. 1c).

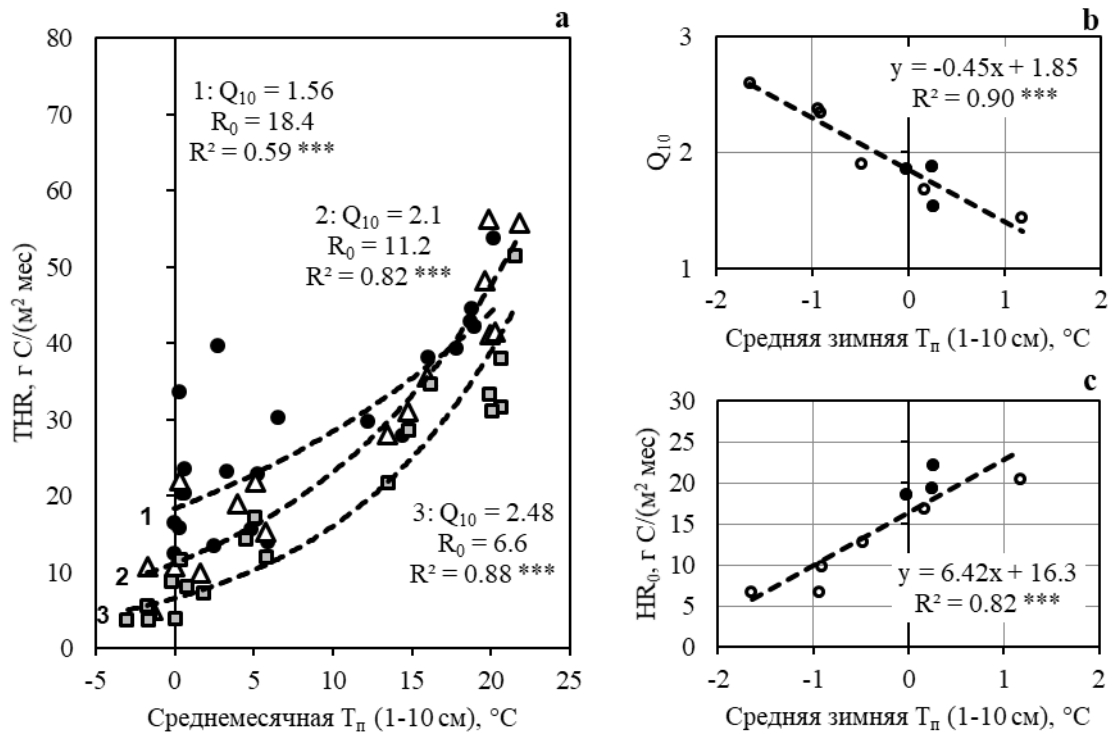


Рисунок 1. Зависимость суммарных месячных величин гетеротрофного дыхания почвы (THR) от среднемесячной температуры почвы ( $T_n$ ) усредненной по глубине 1–10 см в период эксперимента (a) при имитации мягких условий (1), засушливого лета (2) и экстремальных условий (3); зависимость полученных коэффициентов температурной чувствительности  $Q_{10}$  (b) и HR при среднемесячной температуре 0°C –  $HR_0$  (c) за разные годы в трех вариантах от средней зимней (декабрь–февраль)  $T_n$ . Черными кружками отмечены дополнительные значения  $Q_{10}$  и  $HR_0$  в следующий после окончания эксперимента уравнильный год.

Увеличение коэффициента температурной чувствительности  $Q_{10}$  гетеротрофного дыхания почвы в результате усиления экстремальности погодных условий, имитация которых проводилась в настоящем эксперименте, было связано, в первую очередь, с изменением зимнего климата почвы. Варьирование гетеротрофного дыхания почвы при 0°C, как и величина коэффициента  $Q_{10}$ , были тесно связаны со средней зимней температурой почвы. Это показывает, что разложение органического вещества почвы на многолетнем масштабе связано в числе прочих причин с условиями зимнего промерзания почв.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 22-24-00691).

1. Золина О.Г., Булыгина О.Н. Современная Климатическая Изменчивость Характеристик Экстремальных Осадков В России // *Фундаментальная И Прикладная Климатология*. – 2016. – Т. 1. – С. 84-103.
2. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров и др.; ред. Г.А. Заварзин. – Москва: Наука, 2007. – 315 с.
3. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хорошаев Д.А., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмурин В.А., Кудеяров В.Н. Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // *Почвоведение*. – 2020. – № 10. – С. 1220-1236.
4. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Аблеева В.А., Быховец С.С. Климат южного Подмосковья: современные тренды и оценка аномальности // *Фундаментальная и прикладная климатология*. – 2017. – Т. 4. – С. 66-82.
5. Bahn M., Reichstein M., Davidson E.A., Grünzweig J., Jung M., Carbone M.S., Epron D., Misson L., Nouvellon Y., Roupsard O., Savage K., Trumbore S.E., Gimeno C., Curiel Yuste J., Tang J., Vargas R., Janssens I.A. Soil respiration at mean annual temperature predicts annual total across vegetation types and biomes // *Biogeosciences*. – 2010. – Vol. 7. – № 7. – P. 2147-2157.
6. IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / IPCC*. – Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021. – 3949 p.
7. Knorr W., Prentice I.C., House J.I., Holland E.A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming // *Nature*. – 2005. – Vol. 433. – № 7023. – P. 298-301.
8. Kreyling J. The Ecological Importance of Winter in Temperate, Boreal, and Arctic Ecosystems in Times of Climate Change // *Progress in Botany Vol. 81 : Progress in Botany / eds. F.M. Cánovas et al.* – Cham: Springer International Publishing, 2020. – P. 377-399.
9. Sanders DeMott R., Templer P.H. What about winter? Integrating the missing season into climate change experiments in seasonally snow covered ecosystems // *Methods in Ecology and Evolution*. – 2017. – Vol. 8. – What about winter? – № 10. – P. 1183-1191.
10. Zhou L., Zhou X., Shao J., Nie Y., He Y., Jiang L., Wu Z., Hosseini Bai S. Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: a meta-analysis // *Global Change Biology*. – 2016. – Vol. 22. – Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components. – № 9. – P. 3157-3169.

## ОЦЕНКА ВКЛАДА ГЕТЕРОТРОФНОГО ДЫХАНИЯ В ГОДОВОЙ ПОТОК CO<sub>2</sub> ИЗ ПОЧВЫ ХВОЙНО-ШИРОКОЛИСТВЕННОГО ЛЕСА И КОСИМОГО ЛУГА В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО-КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА

*Хорошаев Д.А., Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н.*

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Московская область, г. Пущино, d.khoroshaev@pbcras.ru

Оценка гетеротрофного дыхания почвы (heterotrophic respiration, HR) является необходимым шагом при определении баланса углерода в наземных экосистемах. Данные HR также необходимы для оценки потенциала почвы к секвестрации углерода в форме устойчивого к разложению почвенного органического вещества [2]. Проведение длительных, регулярных измерений HR и его вклада в общий поток CO<sub>2</sub> из почвы даст важную информацию о влиянии погодных условий каждого конкретного года исследований на особенности разложения органического вещества почвы. В настоящее время оценка HR проводится на основе точечных либо усредненных данных, без учета сезонных особенностей вклада корней в формирование суммарного дыхания почвы [1]. Поэтому развитие методических подходов для проведения регулярного мониторинга HR является важным шагом к более глубокому анализу естественной динамики углеродного цикла в наземных экосистемах. Цель исследования заключалась в определении вклада HR в общий поток CO<sub>2</sub> из почвы методом извлечения корней и применимости данного подхода для длительного регулярного мониторинга в лесной и луговой экосистемах южного Подмосковья.

Участки мониторинга располагались на территории Приокско-Террасного биосферного заповедника в хвойно-широколиственном лесу и на косимом лугу (54°54.148' N, 37°33.377' E) на дерново-подбуре супесчаного гранулометрического состава. Климат региона умеренно-континентальный со среднегодовой температурой воздуха за 1981–2010 гг. 5.2 °С и средней годовой суммой осадков 659 мм. Содержание органического углерода в верхнем 10-см слое почвы на лесном участке составлял 12.2 ± 2.8 г С/кг почвы и превышает аналогичный показатель для лугового ценоза — 8.5 ± 0.3 г С/кг почвы [6]. По содержанию азота почвы двух участков не отличаются (0.93–0.96 г N/кг почвы). Мощность лесной подстилки составляет 2–4 см, на лугу присутствует развитая дернина без наличия выраженного слоя травяного опада.

Общее дыхание почвы (soil respiration, SR) определяли еженедельно методом закрытых статических камер в пятикратной повторности в каждом ценозе. В летний период использовали металлические камеры диаметром 10 см и высотой 12 см, которые врезали в почву на глубину 5 см непосредственно перед началом измерений. В зимний период камеры, изготовленные из НПВХ труб диаметром 20 см и высотой 65 см, устанавливали стационарно, заглубляя их в почву на 10 см незадолго до прогнозируемых заморозков. В лесу камеры устанавливали между растениями травянистого яруса без удаления подстилки. На луговом участке перед установкой камеры зеленые части растений срезали. Три пробы воздуха отбирали шприцами через каждые 10 мин в теплый период и через каждые 30 мин в холодный.

Для оценки гетеротрофного дыхания (HR) в почву на глубину 45 см врезали ограничители, представляющие собой пластиковые ПВХ трубы диаметром 20 см. Верхняя часть трубы с патрубком, выходящая из почвы на высоту 10–15 см служила стенками почвенной камеры. Почва внутри трубы была освобождена от корней, просеяна через сито 5 мм и уложена обратно с сохранением порядка слоев и плотности сложения. Зимой высоту камер над участками почвы без корней увеличивали надставкой до 55 см.

Скорость дыхания почв вычисляли по формуле:  $SR(HR) = (C_2 - C_1)H/t$ , где  $SR(HR)$  – скорость общего/гетеротрофного дыхания почв, мг C/(м<sup>2</sup> ч);  $C_2$  и  $C_1$  – конечная и начальная концентрации CO<sub>2</sub> внутри изолятора, мг C/м<sup>3</sup>;  $H$  – высота изолятора над поверхностью почвы, м;  $t$  – время экспозиции, ч. Коэффициент температурной чувствительности  $Q_{10}$  рассчитывали исходя из уравнения  $\ln(R) = a T_p + b$ , где  $a$  и  $b$  – эмпирические константы,  $T_p$  – температура почвы на глубине 7 см. Величина  $Q_{10} = e^{10a}$  показывает во сколько раз увеличивается интенсивность дыхания почвы при увеличении  $T_p$  на 10 °C. Поток CO<sub>2</sub> из лесной подстилки оценивали по разнице потоков HR на лесной и луговой площадках наблюдений исходя из следующих соображений: (1) сильной коррелированности величин HR между луговым и лесным ценозами ( $R^2 = 0.93$ ,  $n = 49$ ) и (2) предположения, что гетеротрофное дыхание почвы, лишенной подстилки, в лесном ценозе не будет сильно отличаться от такового на луговом участке ввиду близости расположения и свойств почв. Второе предположение подтверждается измерениями дыхания почв в моменты, когда подстилка сильно высыхала и имела слабую дыхательную активность. Для того, чтобы учесть особенности динамики разложения подстилки и органического вещества почвы, мы оценили отдельно вклад в общий поток SR гетеротрофного дыхания с поверхности почвы ( $S_{HR_S}$ ) и из подстилки ( $S_{HR_L}$ ). Так как на лугу при определении HR опад отсутствовал, то там определяли только  $S_{HR_S}$ .

Величина SR в период с июля 2022 г. по август 2023 г. варьировала от 15 до 240 мг C/(м<sup>2</sup> час) и составляла в среднем ( $\pm$  доверительный интервал, 95%)  $89 \pm 15$  мг C/(м<sup>2</sup> час) на лугу и  $66 \pm 9$  мг C/(м<sup>2</sup> час) в лесу (Рис. 1а).

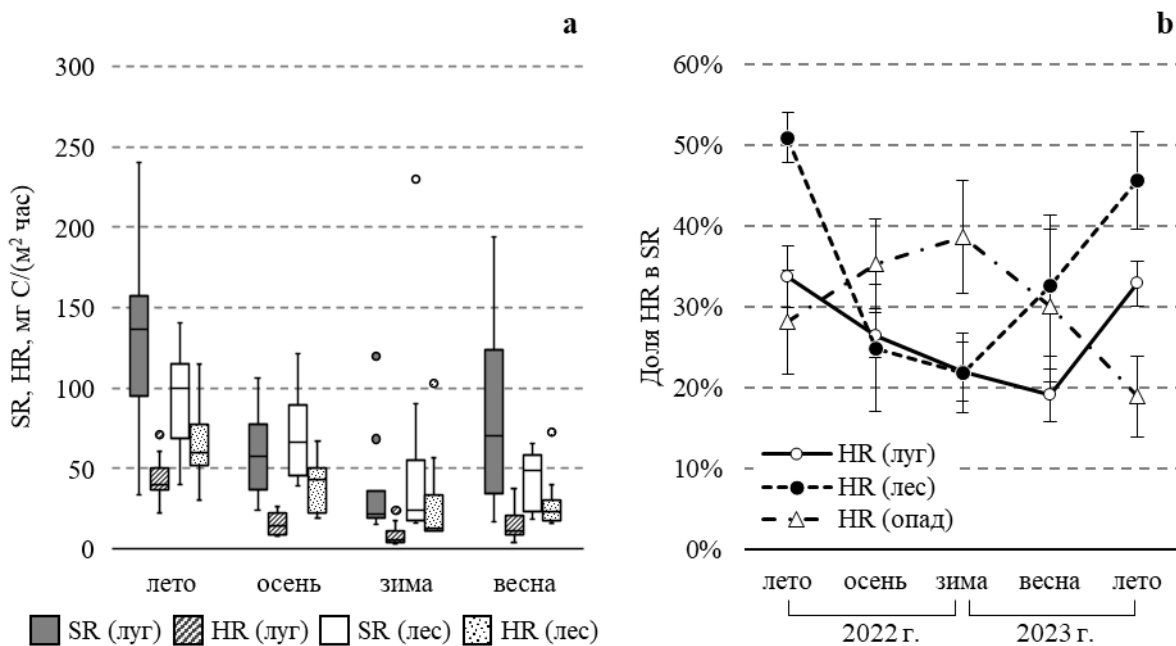


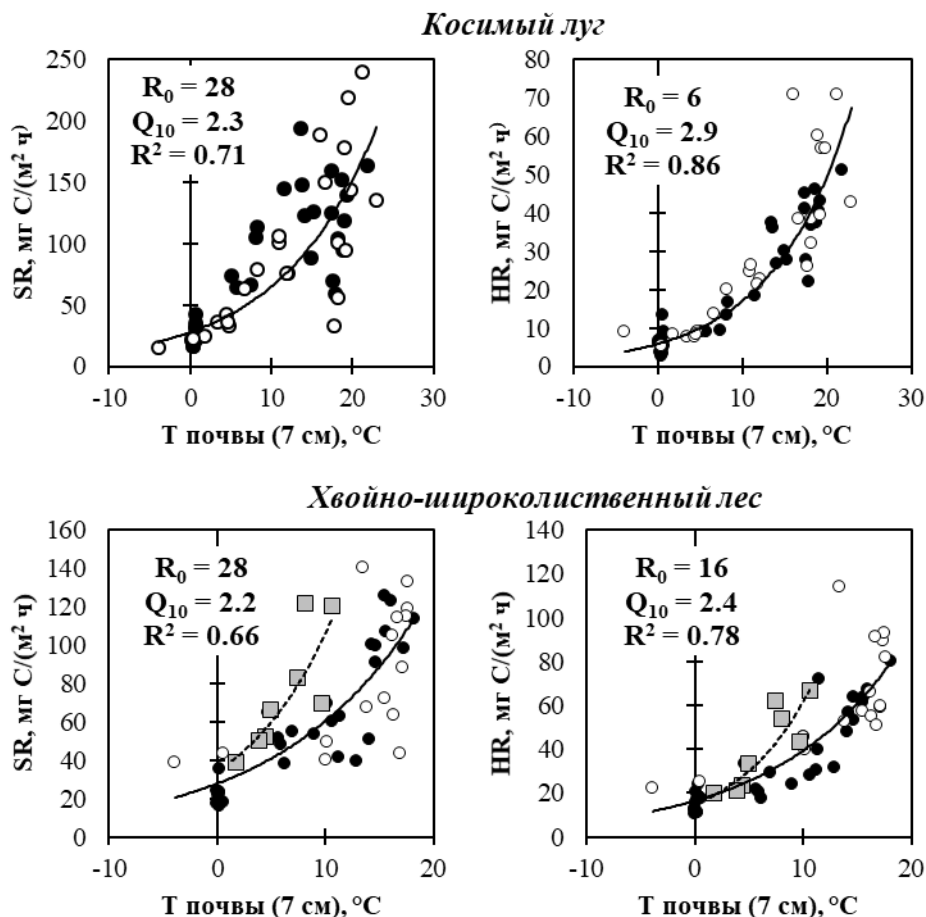
Рисунок 1. Гетеротрофное (включая лесную подстилку, HR) и общее дыхание почв (SR) в разные сезоны года в лесном и луговом ценозах (а) и вклад HR в SR в разные календарные сезоны (б). Вклад HR в лесном ценозе был разделен в соответствии с потоком CO<sub>2</sub> из почвы либо лесной подстилки. Планками погрешностей указан доверительный интервал (95%).

Скорость HR на луговом участке не превышала 71 мг C/(м<sup>2</sup> час) и 114 мг C/(м<sup>2</sup> час) в лесу, составляя в среднем  $25 \pm 5$  мг C/(м<sup>2</sup> час) и  $43 \pm 6$  мг C/(м<sup>2</sup> час) соответственно. Суммарная годовая величина SR (с июля 2022 г. по июнь 2023 г.) достигала 644 г C/м<sup>2</sup> в лу-

говым ценозе и  $522 \text{ г C/m}^2$  в лесном, HR — 172 и  $334 \text{ г C/m}^2$  соответственно. Доля холодного периода (ноябрь–март) в годовой величине SR составляла 18–19% и была выше для HR — 27–31%.

Динамика  $S_{HR_S}$  показывала четкие сезонные закономерности (рис. 1b). Минимальные величины  $S_{HR_S}$  наблюдались в зимне-весенний период на луговом участке (19–22%) и в осенне-зимний период на лесном (22–25%), а максимальные – летом (33–34% и 46–51% в луговом лесном ценозе соответственно). Вклад дыхания подстилки в общую величину SR показывал противоположную закономерность – с зимним максимумом, равным 39% и летним минимумом – 19–28%. Вклад HR в годовое дыхание почвы составил 27% в луговом ценозе и 64% в лесном (почва + подстилка). По полученным нами оценкам лесная подстилка формировала треть (31%) годовой величины SR. Таким образом, в среднем за год вклад HR без подстилки в общее дыхание почв в лесу составил 33% и сблизился со значениями, полученными для лугового участка.

Связь SR и HR с температурой почвы описывалась экспоненциальной зависимостью (Рис. 2). При расчетах удаляли несколько anomalно высоких значений SR и HR в зимний период.



○ июнь-декабрь 2022 г. ● январь-август 2023 г. ■ 21 сен - 29 ноя 2022 г.

Рисунок 2. Связь гетеротрофного (HR) и общего (SR) дыхания почвы с температурой почвы. Величины дыхания почвы при  $0^{\circ}\text{C}$  ( $R_0$ ), температурный коэффициент  $Q_{10}$ .

Для HR температурная зависимость была более тесной ( $R^2 = 0.78\text{--}0.86$ ,  $n = 58$ ), чем для SR ( $R^2 = 0.66\text{--}0.71$ ,  $n = 57\text{--}58$ ). Температурные зависимости для HR, рассчитанные с июня по декабрь 2022 г. и с января по август 2023 г., не показали между собой явных

различий, укладываясь в рамки единого температурного отклика гетеротрофного дыхания почвы. Величина температурного коэффициента  $Q_{10}$  для HR была на 9–24 % выше величины коэффициента  $Q_{10}$  для SR. Осенний листопад приводил к увеличению температурной чувствительности SR и HR в лесном ценозе примерно в 1.5 раза.

Высокая биомасса тонких физиологически активных корней в луговых экосистемах [5] приводит к увеличению их вклада в формирование общего потока  $CO_2$  из почвы по сравнению с лесными экосистемами. Наши результаты показали, что доля гетеротрофного дыхания почвы (за вычетом подстилки) в лесу была в 1.23 раза выше, чем на косом лугу. Используемый метод для оценки HR не учитывает участие детрита как источника органического вещества. Т.е. не учитывается HR, обусловленное разложением свежего органического субстрата – корневых экссудатов и отмерших частей растений. Ранее было показано, что зимой вклад корней в SR значительно снижается [3]. Наши исследования показали, что в холодный период года основным источником  $CO_2$  должен служить углерод, который был накоплен в предшествующий вегетационный период. На это же указывает и возрастающий для зимнего периода вклад подстилки в общий гетеротрофный поток. Полученные результаты согласуются с экспериментальными оценками о роли свежего органического вещества в формировании зимних потоков  $CO_2$  [4].

Различия между коэффициентами  $Q_{10}$ , которые были обнаружены как между SR и HR, так и между лесным и луговым ценозами показывают, что динамика разложения органического вещества сильно варьирует в зависимости от типа экосистемы и микроклиматических условий даже в случае близкого расположения почв и схожести их свойств. Увеличение коэффициента  $Q_{10}$  для лесного ценоза показывает, что для листопадных лесов необходимо дифференцированное использование коэффициента температурной чувствительности в зависимости от времени года.

Метод определения вклада гетеротрофного дыхания почвы, который был использован в настоящем исследовании, показал свою применимость при проведении длительного мониторинга. Однако, для получения более точных оценок составляющих углеродного баланса в экосистемах необходимо проведение исследований, позволяющих учесть участие ризосферы в формировании HR.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122111000095-8).

1. Кудеяров В.Н., Курганова И.Н. Дыхание почв России: анализ базы данных, многолетний мониторинг, общие оценки // Почвоведение. – 2005. – № 9. – С. 1112-1121.

2. Кудеяров В.Н. Секвестрация углерода в почве: факты и проблемы (аналитический обзор) // Успехи Современной Биологии. – 2022. – Т. 142. – Секвестрация углерода в почве. – № 6. – С. 545-559.

3. Ларионова А.А., Евдокимов И.В., Курганова И.Н., Сапронов Д.В., Кузнецова Л.Г., Лопес де Гереню В.О. Дыхание корней и его вклад в эмиссию  $CO_2$  из почвы // Почвоведение. – 2003. – № 2. – С. 183-194.

4. Brooks P.D., McKnight D., Elder K. Carbon limitation of soil respiration under winter snowpacks: potential feedbacks between growing season and winter carbon fluxes // Global Change Biology. – 2005. – Vol. 11. – Carbon limitation of soil respiration under winter snowpacks. – № 2. – P. 231-238.

5. Jackson R.B., Mooney H.A., Schulze E.-D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1997. – Vol. 94. – № 14. – P. 7362-7366.

6. Kurganova I.N., Lopes de Gerenu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Saproinov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov V.N. Analysis of the long-term soil respiration dynamics in the forest and meadow cenoses of the Prioksko-terrasny biosphere reserve in the perspective of current climate trends // Eurasian Soil Science. – 2020. – Vol. 53. – № 10. – P. 1421-1436.



## РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ И ПОЖАРНАЯ ИСТОРИЯ СУБАРКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПУР-ТАЗОВСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ПО ДАННЫМ КОЛОНКИ СКТ-15-3D

Шефер Н.В.<sup>1,2</sup>, Бляхарчук Т.А.<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет, vchifz@mail.ru

<sup>2</sup>ИМКЭС СО РАН, г. Томск, blyakharchuk@mail.ru

Арктическая и субарктическая части Западной Сибири наиболее уязвимы к изменению климата, им характерны суровые природные условия и малочисленность населения, вследствие чего эти земли долгое время, не подвергались антропогенной деформации. Поэтому северные регионы Западной Сибири являются важным и перспективным объектом для проведения палеореконструкций [1,2]. Увеличение антропогенной нагрузки на природу Земли и проблема глобального потепления климата обуславливают необходимость мониторинга изменений окружающей среды [3]. Одним из опорных методов исследования климатических изменений служат палеореконструкции на основе палинологического анализа. Не менее важно ретроспективное изучение частоты пожаров на различных территориях, для выявления границ влияния антропогенного и природных факторов на это катастрофическое явление [3].

В данной работе объектом исследования являются торфяные и подстилающие их озёрные отложения, отобранные в виде колонки длиной 400 см, на полигональном болоте в Тазовском районе, ЯНАО (67°21'25.3" с.ш.; 78°42'11.9" в.д.). Цель работы состоит в реконструкции растительности и пожаров в субарктической части Пур-Тазовского междуречья в голоцене, на основе спорово-пыльцевого анализа, анализа непыльцевых палиноморф и микроугольков колонки СКТ-15-3D.

Район исследований расположен в подзоне южной тундры. Растительный покров представлен сообществами двух- и трехъярусной тундровой растительности с преобладанием кустарников, и кустарничков – карликовых берез, ив, эрикоидных кустарничков, ольхи, значительную часть подзоны занимают болота [4].

Колонка нарезалась на образцы толщиной по 2.5 см. В лаборатории была проведена химическая обработка образцов по методу Эрдмана [5], с применением ацетализа. Для определения концентрации палиноморф в пробы добавляли таблетки на карбонатной основе, содержащие 20848±1546 спор *Lycopodium clavatum* L. (Batchnumber 1031), либо 9666±212 спор *Lycopodium* (Batchnumber 3862). Для образцов нижней части колонки (320 см и ниже) проведена обработка плавиковой кислотой (HF). В исследовании применены: метод абсолютной геохронологии, методы палинологических исследований.

Концентрация пыльцы на см<sup>3</sup> (К) подсчитывалась по формуле:

$$K = k_0 I_{mt}/I_{m0},$$

где  $k_0$  – количество пыльцы в образце;  $I_{mt}$  – количество маркерного *Lycopodium* в таблетке;  $I_{m0}$  – количество маркерного *Lycopodium* в образце.

При построении палинологической диаграммы данные по пыльце и спорам растений были рассчитаны в процентах от суммы всех пыльцевых зерен и спор растений. Данные о присутствии в спектрах НПП даны в абсолютных величинах. Данные о присутствии в спектрах углей показаны в виде концентрации от маркера *Lycopodium*. Радиоуглеродные датировки показали, что отложения относятся к среднему и раннему голоцену: 4510±50 (Ki-20119), 5410±90 (Ki-20120), 5580±90 (Ki-20121), 7310±80 (Ki-20122), 6980±140 (Ki-20124), 9100±50 (Poz-83157). Построенная по этим данным временная модель охватывает период 11,2 кал. (календарных) тыс. л.

Ориентируясь на ограниченный кластерный анализ (CONISS) и калиброванный возраст образцов было выделено 2 палинозоны, каждая из которых была разделена на три подзоны (Рис. 1): СКТ1а (11,2–9,7 кал. тыс. л. н.), СКТ1b (9,7–8 кал. тыс. л. н.), СКТ1с (8–7,3 кал. тыс. л. н.), СКТ2а (7,3–5,5 кал. тыс. л. н.), СКТ2b (5,5–4,7 кал. тыс. л. н.), 2с (4,7 кал. тыс. л. н. – современность).

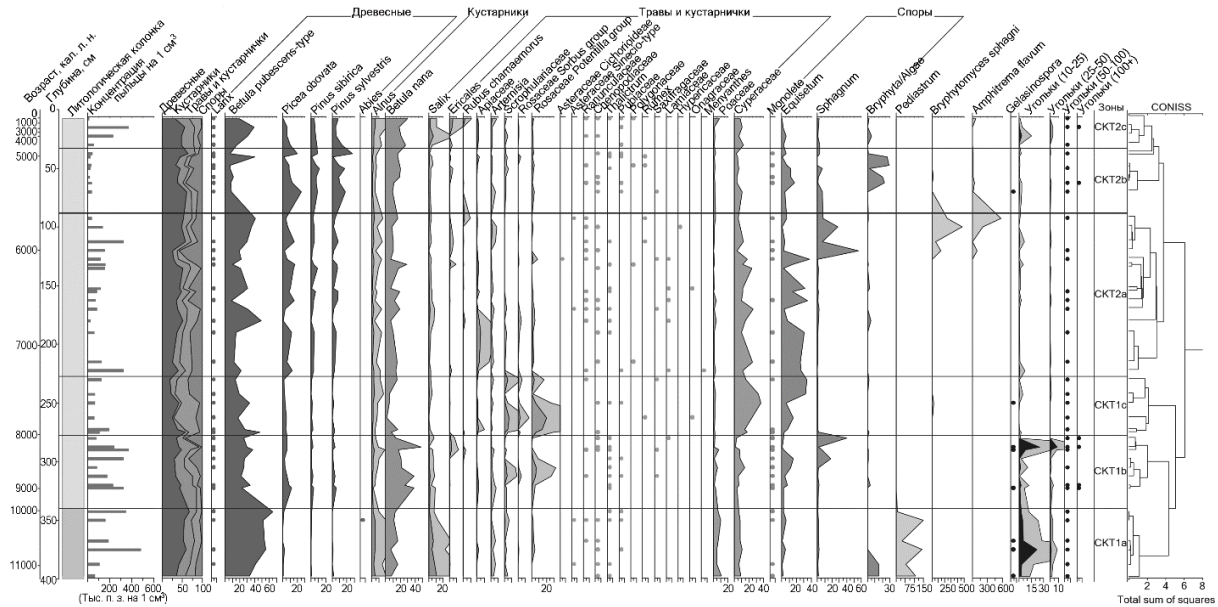


Рисунок 1. Диаграмма колонки СКТ-15-3D.

СКТ1а (400–340 см, 11,2–9,7 кал. тыс. л. н.). В спектрах этого периода доминирует пыльца древесных растений (*Betula pubescens* Ehrh., *Larix* sp., *Picea obovata* Ledeb.) (35,5–67,8 %), пыльца *Betula pubescens* составляет основную долю (33,2–65 %). Обилие пыльцы кустарников – значительно (15,8–27,7 %). Доля пыльцы трав и кустарничков составляет 13,1–22,7 %. Среди трав выделяется повышенное обилие пыльцы Poaceae и Cyperaceae. Присутствует пыльца *Artemisia* sp. и *Chenopodiaceae*. В начале периода участие спор в спектрах составляет 19 % к концу периода уменьшаясь до 2,3 %. В начале периода значительно обилие спор из сводной группы Bryophyta/Algae (15 %), также отмечено присутствие спор *Equisetum* sp. и *Sphagnum* sp.

СКТ1b (340–278 см, 9,7–8 кал. тыс. л. н.). В сравнении с предыдущим периодом, в спектрах подзоны снижается участие пыльцы древесных растений, составляя от 30,1 до 48,1 %. Увеличивается обилие *Picea obovata* (2–12%). Доля пыльцы кустарников увеличивается (22,3–50 %). Среди них доминирует *Betula nana* L., обилие ольхи и ив снижается. Доля пыльцы трав составляет 5,7–29,7 % от пыльцевого спектра. Наиболее значительно участие – Poaceae, Cyperaceae, группы *Potentilla*, *Scrophulariaceae* и порядка *Ericales*. Увеличивается обилие спор (2,2–42,9 %), наиболее значительно участие *Equisetum* sp. и *Sphagnum* sp.

СКТ1с (278–228 см, 8–7,3 кал. тыс. л. н.). Обилие пыльцы древесных и кустарников снижается. В этом периоде доминирует пыльца трав (26,9–56,2 %). Наиболее значительно участие пыльцы Cyperaceae (13,7–36,1 %), *Scrophulariaceae* (0,9–6,4 %) и группы *Potentilla* (0,3–20,5 %). Участие спор *Equisetum* sp. – увеличивается, *Sphagnum* sp. – уменьшается.

СКТ2а (228–90 см, 7,3–5,5 кал. тыс. л. н.). В спектрах этого периода увеличивается обилие пыльцы древесных (25–61,1 %), основную долю составляет *Betula pubescens* (8,3–49,1 %), участие *Picea obovata* увеличивается (0,7–24,9 %). Увеличивается доля пыльцы кустарников (8,3–31,7 %), значительно участие *Betula nana* (6,8–28,8 %). Общая доля

трав составляет 4,8–32,1 %, постепенно уменьшаясь к концу периода. Значительно участие спор (3,9–58,4 %), среди них наибольшее обилие имеют *Equisetum* sp. и *Sphagnum* sp.

СКТ2b (90–35 см, 5,5–4,7 кал. тыс. л. н.). В спектрах этого периода отмечено наибольшее участие пыльцы голосеменных (до 56,2 %), участие *Picea obovata* составляет 1,5–24,9 %. Обилие пыльцы трав снижается, составляя 6,8–16,8 % от общего спектра. Среди спор увеличивается доля Bryophyta/Algae (0–28,8 %), участие прочих таксонов снижается.

СКТ2с (35–0 см, 4,7 кал. тыс. л. н. – современность). В этот период участие *Betula pubescens* незначительно увеличивается (15,2–39,3 %), участие *Picea obovata* уменьшается (10,3–0,6 %). Общая доля пыльцы кустарников увеличивается (24,5–35,6 %). Обилие трав и кустарничков увеличивается (10,4–27,7 %), наибольшее значительное участие Сурепaceae (5,7–12 %) и Роaceae (1,2–8,6 %). Увеличивается доля порядка Ericales (0–4,4 %) и *Rubus chamaemorus* L. (0–2,9 %). Уменьшается участие группы спор (2,7–11,5 %).

Для реконструкции пожаров использованы следующие индикаторы: споры грибов *Gelasinospora* sp., являющиеся маркером локальных пожаров [6,7] и микроугольки. Наибольшая концентрация микроуглей отмечена в период 11,2 кал. тыс. л. н. – 8 кал. тыс. л. н. вероятно в этот период была высокая активность региональных пожаров. Наибольшее количество микроуглей и наличие спор *Gelasinospora* sp. отмечено в образцах, соответствующих 11,2 кал. тыс. л. н., 8,2 кал. тыс. л. н. – 8,1 кал. тыс. л. н., свидетельствует о пожарах в непосредственной близости от места колонки СКТ-15-3D. Вероятно их масштаб значительно превышал локальные пожары, отмеченные 10,7 кал. тыс. л. н., 10,5 кал. тыс. л. н., 9 кал. тыс. л. н., 7,6 кал. тыс. л. н. и 5,4 кал. тыс. л. н. в спектрах которых также было отмечено наличие спор гриба *Gelasinospora* sp. В образцах периода 8 кал. тыс. л. н. – 4,7 кал. тыс. л. н. также отмечено присутствие микроуглей. В спектрах соответствующим – 7,5 кал. тыс. л. н., 6,9 кал. тыс. л. н., 6,5 кал. тыс. л. н., 5,3 кал. тыс. л. н., 5 кал. тыс. л. н., 4,9 кал. тыс. л. н., 4,7 кал. тыс. л. н. концентрация угольков позволяет предположить региональный характер пожаров, концентрация микроугольков, в остальных спектрах этого периода незначительна и вероятно свидетельствует о пожарах, произошедших в значительном отдалении от региона исследования. Для периода 4,7 кал. тыс. л. н. – современность отмечено значительное участие микроуглей. Однозначно интерпретировать это как возросшую активность пожаров не представляется возможным, по причине замедления скорости осадконакопления в этот период.

На территории Пур-Тазовского междуречья на протяжении всего исследованного периода присутствовала древесная растительность, представленная *Larix sibirica* Ledeb. и *Betula pubescens*. *Picea obovata* присутствовала в зоне исследования в период 9–4,7 кал. тыс. л. н., наибольшее участие ели в древесном ярусе сообществ отмечено 7,2–4,9 кал. тыс. л. н. В месте отбора колонки постепенно происходил процесс заболачивания. В начале периода (11,2 кал. тыс. л. н.) в зоне исследования преобладали сухие разнотравные луга и озёра, постепенно сменившиеся эвтрофным болотом, вероятно подобным современным хасыреям, со временем, перешедшим в мезотрофную (7,4 кал. тыс. л. н.) и олиготрофную (6,7 кал. тыс. л. н.) стадии. Вероятно, под влиянием похолодания и распространения вечной мерзлоты в грунтах, в период 5–4 кал. тыс. л. н., болото преобразовалось в полигональное болото. Пожары значительно влияли на растительный покров региона в исследованном периоде, особенно пожары, произошедшие 11,2 кал. тыс. л. н. и 8,1 кал. тыс. л. н. Наименьшая пожарная активность в регионе отмечена в период 7,5–5,4 кал. тыс. л. н.

1. ACIA, 2005 Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge University Press, 2005. 1042 p.
2. Koenigk T., Brodeau L. Arctic climate change in 21st century CMIP5 simulations with EC-Earth / T. Koenigk, L. Brodeau, R. G. Graversen et al. // *Climate Dynamics*. 2013. V. 40. P. 2719–2743.
3. Бляхарчук Т.А. Тартаковский В.А. Микрооптический метод индикации палеопожаров // Шестое Сибирское Совещание по климато-экологическому мониторингу. Томск, 2005. С. 275–278.
4. Дедю И.И. Экологический энциклопедический словарь. Кишинев: Гл. ред. Молд. сов. энцикл., 1989. 406 с.
5. Erdtman G. An Introduction to Pollen Analysis. Waltham. *Chronica Botanica*, 1943. 239 p.
6. Wicklow D. T. Fire as an environmental cue initiating ascomycete development in a tallgrass prairie // *Mycologia*. 1975. V. 67. №4. P. 852–862.
7. Wicklow D. T., Hirschfield B. J. Competitive Hierarchy in Post-Fire Ascomycetes // *Mycologia*. 1979. V. 71. №1. P. 47–54.

---

## Секция 3

# Современные экологические проблемы и риски, техногенные системы, перенос загрязнений в окружающей среде

---

### МЕСТО РЕКУЛЬТИВАЦИИ ПОЧВ В СИСТЕМЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

*Алемасова В.А., Ахметова А.Д.*

Новосибирский государственный педагогический университет,  
valeriya.alemasova@mail.ru, anastasiaahmetova131@gmail.com

Устойчивое развитие – это такое развитие общества и экономики, при котором удовлетворяются потребности нынешнего поколения, не ставя под угрозу жизнедеятельность и безопасность будущих поколений. В концепции устойчивого развития учитываются 3 составляющие: экономическая, социальная и экологическая.

Экономический подход к концепции устойчивости развития основан на теории максимального потока совокупного дохода, который может быть произведен при условии, по крайней мере, сохранения совокупного капитала, с помощью которого и производится этот доход. Эта теория подразумевает оптимальное использование ограниченных ресурсов и использование экологичных, природо-, энерго- и материало-сберегающих технологий, включая добычу и переработку сырья, создание экологически приемлемой продукции, минимизацию, переработку и уничтожение отходов [1]. Если не будет учитываться экономический подход, то произойдет деградация природных ресурсов, что, в свою очередь, приведет к необходимости больших затрат на разработку их восстановления.

Социальная точка зрения ориентирована на сохранение человека как вида и направлена на стабильность социальных и культурных систем, а также на справедливое распределение благ. При этом изменятся такие социальные показатели, как смертность и снижение заболеваний, увеличение доходов на душу населения, обеспечение материальными и нематериальными благами и т.д.

С экологической точки зрения устойчивое развитие должно обеспечивать целостность природных систем, в которые включаются также нарушенные и преобразованные человеком экосистемы: антропогенные ландшафты, города и т.д. Основное внимание уделяется сохранению способностей к самовосстановлению и динамической адаптации таких систем к изменениям. Деградация природных ресурсов, загрязнение окружающей среды, снижение биологического разнообразия сокращают способность экологических систем к самовосстановлению.

Три составляющие устойчивого развития должны рассматриваться сбалансировано.

По данным федеральной службы государственной статистики [2], в России 197 745 га площади сельскохозяйственных земель, подверженных деградационным процессам. А нарушенных земель добычей природных ископаемых 195 240 га.

Рекультивация является важным элементом экологической составляющей концепции устойчивого развития. Под рекультивацией понимают создание почвенного покрова

с заранее заданными параметрами, то есть это комплекс работ, направленных на восстановление продуктивности и хозяйственной ценности нарушенных земель, а также на улучшение условий окружающей среды.

Восстановлению подлежат экосистемы, уничтоженные при добыче и переработке полезных ископаемых различными способами (открытым и подземным); при строительстве трубопроводов; проведении геологоразведочных, мелиоративных, эксплуатационных, испытательных, проектно-изыскательных и иных работ, связанных с нарушением почвенного покрова; при захоронении и складировании различных видов отходов (ТБО, промышленных и т.д.; при ликвидации ЧС, приведших к загрязнению земель, если по проекту требуется снятие плодородного слоя почв (ПСП) или с потенциально плодородными породами (ППП); при учении силовых ведомств за пределами полигонов .

Восстановление нарушенных ландшафтов, а также экосистем необходимо для различных целей: сельскохозяйственное – создание на деградированных землях сельхоз угодья; лесохозяйственное – лесокустарниковые насаждения; рекреационное – объекты для отдыха; водохозяйственное – создание на местах карьеров и выемок водоёмов; природоохранное – приведение нарушенных земель в состояние, пригодное для использования в природоохранных целях; строительное – приведение нарушенных земель в состояние, пригодное для промышленного, гражданского и прочего строительства; санитарно – гигиеническое – выполнение биологической или технической консервации земель, оказывающих отрицательное воздействие на окружающую среду.

Биологическая рекультивация нарушенных земель осуществляется на основе сельскохозяйственного подхода, предусматривающего восстановление плодородия путем нанесения смеси ПСП+ППП, внесения удобрений и различных мелиорантов, определение сортов трав и деревьев, устойчивых в техногенной среде, и их высаживание.

Почва – основа любого природного ландшафта. Почва – это фактор плодородия для растений и как самая насыщенная организмами среда. Ни в какой другой среде нельзя встретить такой плотности биоты как в почве. В почве постоянно идут процессы жизнедеятельности множества видов растений, животных, бактерий, грибов. Здесь также берут свое начало практически все пищевые цепи, выбирая из нее минеральные вещества и создавая из них органику, и здесь же они заканчиваются, замыкая круговорот веществ и элементов в природе. Исключительно важна роль почвы как санитарного барьера.

Почва имеет высокую степень буферности и «запас прочности». Это означает, что почва может выдерживать значительные воздействия и довольно быстро после них восстанавливаться. Тем не менее на современном этапе у почвы всё меньше сил справиться с той нагрузкой, которую оказывает на неё человек. Именно поэтому деградация почв имеет антропогенный характер.

То, что почва – важнейший компонент окружающей природной среды не случайно. Все её особенности функционирования связаны с главным показателем - плодородием.

На современном этапе особенность воздействия человека на естественные ландшафты достигла уровня, при котором отрицательные последствия оказывают существенное влияние на естественные природные процессы, в том числе на саму среду обитания человека. Интенсификация промышленного производства привела к нарушению почвенного покрова. К этому приводят различные виды деятельности человека: добыча полезных ископаемых открытым способом сопровождается возникновением отвалов и терриконов, нарушающих растительный и почвенный покров, гидрологический и геохимический режимы территории. Для сохранения почвенного покрова должна производиться селективная выемка и складирование ПСП и ППП, чтобы использовать в будущем данный невозобновимый и невосполнимый ресурс для рекультивации нарушенных территорий. При подземной добыче угля, руды происходит развитие просадочных явлений и других отрицательных воздействий. Добыча нефти ведёт к загрязнению и уничтожению

экосистем (например, тундровые). Гражданское и промышленное строительство, сооружение линейных объектов ведёт к полному уничтожению почвенного покрова и бессрочным изъятием почв из сельхозоборота.

Практические во всех случаях происходит разрушение или омертвление почвенного покрова, что приводит к сдвигу экологического состояния ландшафтов в отрицательную сторону. Антропогенные ландшафты обладают низкой способностью к самовосстановлению. Если же способность присутствует, то на восстановление естественным путем уходят десятки лет. Именно с этим появилась проблема рекультивации. Полное восстановление до ненарушенного состояния ландшафта невозможно в принципе, потому что почва невоспроизводимый природный ресурс. Так как перевод земель в категорию промышленных обусловлено производственной необходимостью, то полностью остановить этот процесс также невозможно, но можно регулировать и сводить к минимуму негативные последствия путем восстановления ландшафтной обстановки подобной прежней. Поэтому при разработке проекта рекультивации необходимо ставить задачу – создание оптимального для конкретной территории ландшафта, которое будет выполнять определенную этим проектом функцию (природоохранную, средовоспроизводящую, ресурсовоспроизводящую).

Для разработки эффективных методов восстановления нарушенных земель необходимо учитывать динамику экологических условий и прогнозировать их возможные изменения в будущем. Для этого необходимы комплексные экологические исследования, которые включают анализ формирования почв, растительности и фауны в зависимости от геоморфологии, литологии, гидрогеологии и зонально-климатических условий.

В России в настоящее время предложено несколько технологий рекультивации, направленных не только на восстановление сельскохозяйственных угодий и элементов природы, но и на поддержание почвенных экологических функций. Применяются в основном два способа рекультивации.

Первый способ – проведение многолетних фитомелиораций с внесением органических добавок и минеральных удобрений.

Второй способ – нанесение смеси ПСП и ППП с последующими фитомелиорациями, внесением органических и минеральных удобрений.

Выбор методов восстановления нарушенных земель зависит от того, как они будут использоваться в будущем. Выбранный подход основывается на всестороннем анализе природных условий региона (климата, геологического строения, растительности, почв), состояния техногенных участков перед восстановлением (характера техногенного рельефа, естественной регенерации и других факторов), минералогического состава, физических, химических и агрохимических свойств поверхностных пород и их пригодности для биологической рекультивации. Также учитываются инженерно-геологические и гидрологические условия, хозяйственные, социально-экономические и санитарно-гигиенические условия, продолжительность службы восстановленных участков (возможность повторного нарушения и периодичность таких нарушений) и технологии и механизации горных строительных работ.

Рекультивация земель осуществляется обычно в несколько этапов. Первый – подготовительный. Он включает в себя изучение специфики их природных условий (геологического строения, состава пород, пригодности их к биологической рекультивации и другим видам использования, прогноз динамики гидрогеологических условий), определение направлений рекультивации и целевого использования рекультивируемых земель, установление требований к последующим этапам рекультивации; составление технико-экономического обоснования и рабочих проектов и планов. Второй этап – горнотехнический. Он включает мероприятия, направленные на подготовку территории к дальней-

шему использованию. Сюда входит планировка поверхности, формирование «жизнеобеспечивающего» слоя почвы на спланированную поверхность, прокладывание необходимых дорог, каналов, коллекторно-дренажной сети, создание ложа водоема и т.д. Конечная стадия этого этапа – укладка на выровненную поверхность смеси ПСП и ППП мощностью 0,3–0,5м для сельскохозяйственного и лесохозяйственного использования. Третий, биологический, этап – это комплекс мероприятий по восстановлению плодородия нарушенных земель. К нему относятся комплекс агротехнических и фитомелиоративных мероприятий, направленных на возобновление флоры и фауны, целевое использование рекультивируемой территории. Общая продолжительность периода, в течение которого осуществляется весь комплекс рекультивационных работ, составляет десять и более лет.

Современные подходы к рекультивации нарушенных ландшафтов служат неотъемлемой частью экологической составляющей концепции устойчивого развития. Тем не менее, при проведении экологических экспертиз проектов рекультивации довольно часто приходится сталкиваться с устаревшими научными подходами к рекультивации антропогенных экосистем, что свидетельствует об отсутствии связей между научными учреждениями, пользователями ресурсов и проектными организациями. С учетом современных геополитических реалий, вызванных напряженной международной обстановкой, нельзя относиться к охране окружающей среды, не имея в арсенале передовых технологий, по остаточному принципу, безответственно. Нужно сохранять баланс триединой системы устойчивого развития для благополучия будущих поколений.

1. Гвишиани Д. М. Мосты в будущее. М.: Едиториал УРСС, 2004. —368 с.
2. Охрана окружающей среды в России. 2022: Стат. сб. —М.: Федеральная служба государственной статистики , 2022. – 115 с.



## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИЙ ДЫМОВЫХ ШЛЕЙФОВ ТЭЦ ПО СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ

*Амикишиева Р.А.<sup>1,2</sup>, Рапута В.Ф.<sup>1</sup>, Леженин А.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
г. Новосибирск, [russlana215w@mail.ru](mailto:russlana215w@mail.ru), [raputa@sscc.ru](mailto:raputa@sscc.ru), [lezhenin@ommfao.sccc.ru](mailto:lezhenin@ommfao.sccc.ru)

<sup>2</sup>Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА»,  
г. Новосибирск

Дымовые шлейфы, исходящие из высотных труб ТЭЦ, позволяют изучать их распространение на высотах пограничного слоя атмосферы и численно исследовать фазу активного подъема [1, 2]. Спутниковые снимки открывают в этом плане определённые возможности [3, 4]. Траектории дымовых струй показывают направление и скорость ветра. Визуальная протяжённость шлейфов может достигать десятков километров. Теория подобия и размерностей является удобным инструментом исследования [5, 6]. На основе физических соображений, вводится поток плавучести, характеризующий воздействие перегретого дымового выброса и скорости его истечения, масштаб длины, который связан со скоростью ветра. Введённый масштаб длины устанавливает связь с высотой подъема шлейфа и его переносом в поле ветра. Эта зависимость выражается «законом 2/3». Он позволяет определять параметры траекторий подъема дымовых струй и получать оптимальные значения тепловых и динамических характеристик выбросов при эксплуатации и проектировании дымовых труб [7].

Целью работы состоит в разработке моделей оценивания параметров траекторий подъема дымовых шлейфов, поступающих в атмосферу из высотных труб ТЭЦ, на основе теории подобия и размерности, с привлечением аэрологических данных и спутниковой информации.

Дымовые выбросы в атмосферу от ряда крупных тепловых станций Западной Сибири послужили объектами исследований. К ним относятся Барнаульская ТЭЦ-3 и Омская ТЭЦ-5. Высоты основных труб этих станций превышают 200 метров и, следовательно, выбросы из них находятся на высотах пограничного слоя атмосферы. Фрагменты спутниковых снимков окрестностей рассматриваемых тепловых станций приведены на рис. 1. Снимки получены Сибирским центром ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «ПЛАНЕТА» (<http://www.rcpod.ru>).

На рис. 1 достаточно отчетливо фиксируются шлейфы и их тени на заснеженной поверхности земли. Из рис. 1а следует, что дымовой шлейф уходит в направлении на северо-восток, рис. 1б показывает, что шлейф сносится в западном направлении. Направления стадии пассивного переноса примесей показаны красными линиями. Положения теней осей шлейфов на земной поверхности трассированы зелёными ромбиками.

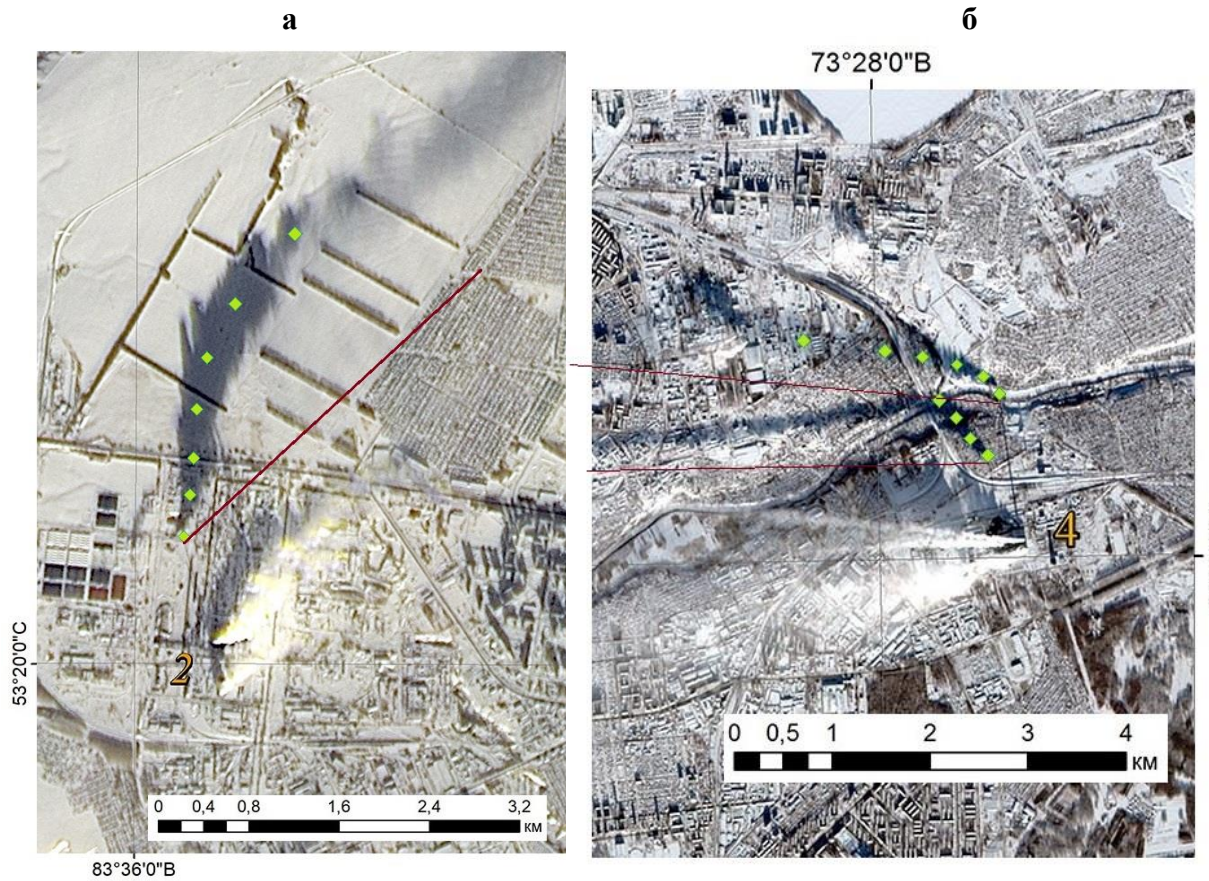


Рисунок 1. Спутниковые снимки окрестностей ТЭЦ-3 г. Барнаула за 2.12.2018 г. в 04:07 UTC с ИСЗ «Ресурс-П» (а) и ТЭЦ-5 г. Омска 24.12.2018 г. в 07:42 UTC с ИСЗ «Sentinel-2B» (б).

Для проведения исследований наиболее целесообразно использовать спутниковые снимки, выполненные в зимний период времени. В это время тени дымовых шлейфов визуализируются наиболее контрастно на заснеженной земной поверхности. Критериями выбора подходящих снимков являлись достаточная протяжённость теней шлейфов и фиксация ими (тенями) активной фазы подъёма.

На рис. 2 представлена пространственная трассировка положения осей шлейфов, рассчитанная по данным, приведённым на рис. 1. При этом учитывался угол и азимут солнца [8].

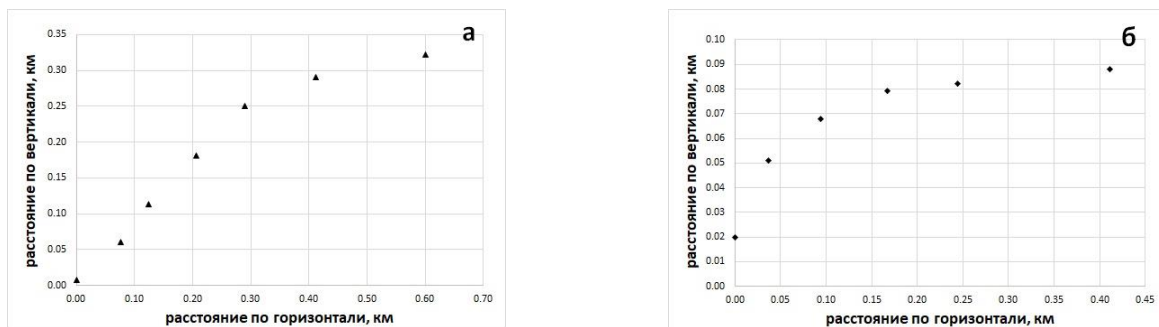


Рисунок 2. Расположения точек на осях дымовых шлейфов от труб тепловых станций рассчитанные по спутниковой информации для ТЭЦ-3 г. Барнаула (а), ТЭЦ-5 г. Омска (б).

Из рис. 2а следует, что активный подъём шлейфа происходил до высот более 300 м от устья трубы и на протяжении 600 м по горизонтали, что было обусловлено слабым ветром в пограничном слое атмосферы. Для случая более сильного ветра высота подъёма шлейфа достигла 90 м от устья трубы при его горизонтальной протяженности около 400 м (рис. 2б).

Соображения размерности, использованные в [6, 7], позволили количественно связать высоту подъёма  $z$  дымового факела с горизонтальным переносом в направлении  $x$  соотношением

$$z = C l^{1/3} x^{2/3}, \quad (1)$$

$$l = \frac{F}{u^3}, \quad (2)$$

$$F = g w_s r^2 (1 - T_a/T_c), \quad (3)$$

где  $l$  – масштаб длины (м),  $F$  – параметр силы плавучести ( $\text{м}^4/\text{с}^3$ ),  $u$  – средняя скорость ветра в слое распространения примеси (м/с);  $g$  – ускорение свободного падения ( $\text{м}/\text{с}^2$ );  $w_s$  – скорость газовой смеси на выходе из трубы (м/с);  $r$  – радиус трубы (м);  $T_c$  – температура смеси ( $^\circ\text{К}$ );  $T_a$  – температура окружающего воздуха ( $^\circ\text{К}$ ).

Если положить

$$A = C l^{1/3}, \quad (4)$$

то постоянную  $A$  можно определить по наблюдениям траекторий дымовых струй, используя метод наименьших квадратов. Оценка неизвестного параметра  $A$  находится, исходя из минимума следующей целевой функции

$$F(A) = \sum_{n=1}^N [z_n - A x_n^{2/3}]^2, \quad (5)$$

где  $x_n$ ,  $z_n$  – измеренные по снимкам пространственные координаты точек на оси дымового факела,  $n = 1, \dots, N$ .

Если известен поток плавучести  $F$  и скорость среднего ветра  $u$  по оценке  $A$ , выполненной по (2), (4) можно вычислить величину  $C$ .

С привлечением целевой функции (5) и данных, приведённых на рис. 2, были определены значения параметров  $A$  и  $C$  для рассматриваемых труб. Для ТЭЦ-3 г. Барнаула  $A = 0,49$ ,  $C = 0,27$ . Для ТЭЦ-5 г. Омска  $A = 0,21$ ,  $C = 0,34$ . Отметим, что оценки параметра  $C$  оказались достаточно близкими, что подтверждает универсальность соотношения (1).

Выполненное исследование демонстрирует возможность численного определения траекторий дымовых струй от труб ТЭЦ на основе соотношений теории подобия и спутниковой информации. В случае отсутствия сведений о динамических и тепловых параметрах выбросов дымовых смесей от труб промышленных предприятий развиваемые методы дают возможность внешним образом контролировать процессы распространения примесей в пограничном слое атмосферы.

Работа выполнена в рамках государственного задания для ИВМиМГ СО РАН (проект 0251-2022-0003).

1. Федосов А.А., Чичирова Н.Д., Шарифуллин А.Ш. Моделирование начального подъема выбросов тепловых электрических станций. 5. Совместный расчет динамического и теплового подъема // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2003. № 5-6. С.14–20.

2. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.

3. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Стальная М.В. Использование данных ИСЗ Landsat для определения концентрации загрязнителей в шлейфах от продувки газовых скважин на основании модели источника // Исследование Земли из космоса. 2014. № 2. С. 55–66. DOI: 10.7868/S0205961414020031.
4. Sofiev M., Ermakova T., Vankevich R. Evaluation of the smoke-injection height from wild-land fires using remote-sensing data // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. P. 1995–2006. DOI: 10.5194/acp-12-1995-2012.
5. Chanady G.T. Some observations on smoke plumes // Int. J. Air Water Poll. 1961. V. 4. P. 47–51.
6. Briggs G.A. Plume Rise // Atomic Energy Commission Critical Review Series. 1969. № 2507581.
7. Мирсалихов К.М., Грибков А.М., Чичирова Н.Д. Аналитический обзор методик выбора оптимальных параметров дымовых труб // Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 1. С. 131–145.
8. Рапуга В.Ф., Леженин А.А. Оценка высоты подъёма дымового шлейфа по спутниковым снимкам // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 06. С. 471–475. DOI: 10.15372/AOO20200609.

## РТУТЬ В ПОСТПИРОГЕННЫХ ПОЧВАХ ЛЕСОТУНДРЫ ЯНАО

*Ватутин Г.Д., Филимоненко Е.А.*

Тюменский государственный университет, georgyvatutin@yandex.ru

Ртуть (Hg) – высокотоксичный тяжелый металл, способный накапливаться в живых организмах и мигрировать по трофическим цепям. До 93% переносимой Hg из умеренных широт от природных (дегазация земной коры, вулканическая активность) и антропогенных (нефтеперерабатывающие, горнодобывающие и другие промышленные предприятия) источников осажается в арктических экосистемах [Eyrikh, Shol, Shinkaruk, 2022; АМАР, 2011]. Осаждаемая из атмосферы газообразная ртуть Hg(0) является основным источником ее в растениях (в среднем 90%), органическом и верхнем минеральном горизонтах почв лесотундры (73% и 55% соответственно) [Obrist, Agnan, Jiskra, et.al., 2017]. Накопление Hg в растительном покрове лесотундры и ее последующее поступление в мерзлотные почвы делает последние одним из ключевых резервуаров Hg в наземных экосистемах [Schuster, Schaefer, Aiken, et.al., 2018]. При этом в результате природных пожаров Hg, накопленная в органических горизонтах почв, вторично поступает в атмосферу [Friedli, Arellano, Cinnirella, et.al., 2009; Schaefer, Elshorbany, Jafarov, et.al., 2020; Giesler, Clemmensen, Wardle, et.al., 2017].

Цель нашего исследования заключается в анализе взаимосвязи содержания органического углерода ( $C_{орг}$ ) и Hg в почвах лесотундры Западной Сибири и оценке влияния природных пожаров на содержание Hg в почвах. Мы предполагаем, что содержание Hg в почвах лесотундры контролируется содержанием  $C_{орг}$  и снижается в результате природных пожаров.

Для проведения исследования были выбраны 5 территорий в пределах лесотундры Тазовского и Надымского районов Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), на которых воздействие природного пожара было от нескольких месяцев до 32 лет назад. На каждой из территорий отбор проб почв производился на парных участках – пирогенно трансформированном и контрольном, в пяти полевых повторностях в органическом и минеральном (с глубин 0–5 и 5–10 см) горизонтах. Все пробы почв (162 образца) были высушены при комнатной температуре, просеяны через сито с размером ячейки 2 мм и гомогенизированы на вибрационной мельнице Retsch MM 400. Для аналитического определения содержания Hg применяли метод атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе «РА-915М» с пиролитической приставкой «РП-91С» (Люмэкс, Россия) в лаборатории экологических исследований ЦКП «Рациональное природопользование и физико-химические исследования» Института химии Тюменского государственного университета (ТюмГУ). Содержания  $C_{орг}$  были найдены методом сухого сжигания на элементном анализаторе Vario Pyro Cube Analyzer (Elementar, Германия) в Центре изотопной биогеохимии ТюмГУ.

Концентрации Hg и  $C_{орг}$  в почвах лесотундры на фоновых участках характеризуются тесной корреляционной связью: с увеличением в почвах содержания  $C_{орг}$ , концентрации Hg статистически значимо увеличиваются ( $r=0,91-0,94$ ;  $p<0,05$ ). Корреляция между  $C_{орг}$  и Hg в неподверженных пожарам почвах типична и для других типов почв и климатических зон, например, для дерново-подбуров Воронежской лесостепи ( $r=0,74$ ) [Удоденко, Комов, Горбунова и др., 2019], торфяных почв Западной Сибири ( $R_{Spearman}=0,60$ ) [Lim, Jiskra, Sonke et.al., 2020]. При этом в постпирогенных почвах взаимосвязь между содержаниями Hg и  $C_{орг}$  слабая ( $r=0,36-0,47$ ;  $p<0,05$ ), что обусловлено термическим разрушением химических связей Hg-C в почвах при пожаре и последующей потерей Hg из верхних слоёв почвы [Biswas, Blum, Keeler, 2008].

В органическом горизонте почв лесотундры Тазовского и Надымского районов ЯНАО средняя концентрация Hg для контрольных участков составляет  $115 \pm 28$  нг/г (min – 60 нг/г, max – 207 нг/г) что превышает кларк Hg в почве (10 нг/г) [Агбалян, Листишенко, 2017; Удоденко, Комов, Горбунова и др., 2019] в 11 раз. Схожие данные по содержанию Hg в органическом горизонте были получены для почв Аляски. На западном побережье Аляски средняя концентрация Hg в органическом горизонте почв составила  $106 \pm 13$  нг/г, на северном склоне –  $99 \pm 6$  нг/г, а на полевой станции «Toolik Field Station» –  $151 \pm 7$  нг/г [Olson, Jiskra, Biester, 2018]. Среднее содержание Hg в органическом горизонте почв на о. Шпицберген (Норвегия) составляет  $111 \pm 36$  нг/г [Halbach, Mikkelsen, Berg, et.al., 2017]. Пирогенный фактор снижает среднее содержание Hg в органическом горизонте ( $81 \pm 17$  нг/г) в среднем на 42%. Концентрации Hg на горелых участках через 2–3 года после пожара ( $33 \pm 4$  -  $134 \pm 14$  нг/г) снижены относительно контрольных территорий ( $60 \pm 5$  -  $207 \pm 50$  нг/г) на 55–80%.

Среднее содержание Hg в минеральном горизонте почв на глубине 0–5 см составляет  $20 \pm 8$  нг/г (min - 13 нг/г, max - 33 нг/г), что превышает кларк Hg в почве в 2 раза. На глубине 5–10 см концентрация Hg в почве равна  $10 \pm 2$  нг/г (min – 8 нг/г, max - 14 нг/г) и в целом соответствует кларку Hg в почве. Полученные средние концентрации Hg в минеральных горизонтах лесотундровых почв значительно отличаются от данных, полученных для верхних минеральных горизонтов почв, которые расположены в других арктических регионах -  $97 \pm 13$  нг/г [Obrist, Agnan, Jiskra, et.al, 2017], 40 нг/г [Olson, Jiskra, Biester, et.al, 2018], 46 нг/г [Loseto, Siciliano, Lean, 2004]. Данные о содержании Hg в минеральных горизонтах арктических территорий согласуются с концентрациями Hg в минеральном горизонте почв Норвежской Арктики ( $25 \pm 13$  нг/г) [Halbach, Mikkelsen, Berg, et.al., 2017] и в минеральном горизонте почв Гренландии на четырёх участках (10–30 нг/г) [Riget, Asmund, Aastrup, 2000].

На постпирогенном участке лесотундры, где природный пожар был менее года назад, среднее содержание Hg на глубине 0–5 см снижено относительно контрольного участка на 10% и в среднем составляет  $13 \pm 2$  нг/г. Наибольшие понижения средних содержаний Hg (на 50 и 90%) отмечены на участках через 2 и 4 года после природного пожара. Пирогенный фактор является источником реэмиссии накопленной в почвах Hg в атмосферу [Eyrikh, Shol, Shinkaruk, 2022] и снижает среднее содержание Hg в почве на глубине 0–5 см ( $14 \pm 5$  нг/г) в среднем на 40%.

На горелых территориях через 2 и 4 года после пожара, средние содержания Hg в почве на глубине 5–10 см ( $6 \pm 1$ ;  $9 \pm 2$  нг/г) значительно (на 53 и 64%) снижены в сравнении с содержаниями Hg в почве фоновых территорий –  $10 \pm 2$ ;  $14 \pm 3$  нг/г.

Однако, различие между средними содержаниями Hg в постпирогенных ( $10 \pm 3$  нг/г) и фоновых ( $10 \pm 2$  нг/г) участках почв лесотундры на глубине 5–10 см незначительно. Это обусловлено тем, что основная часть Hg, которая улетучивается в атмосферу при пожарах, находится на глубине не более 5 см [Abraham, Dowling, Florentine, 2018].

Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено, что содержание Hg в почвах лесотундры тесно коррелирует с содержанием  $C_{орг}$ . Пирогенный фактор приводят к потерям Hg из органического и верхнего минерального горизонтов на глубине до 5 см.

Исследование выполнено при поддержке проекта Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра № 89-ДОН и проекта CarboRus (075-15-2021-610).

1. Агбалян Е.В., Листишенко А.А. Накопление поллютантов (ртути и кадмия) в почве, растительности и организме животных // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2017. № 3. С. 4–10.

2. Удоденко Ю.Г., Комов В.Т., Горбунова Ю.С., Девятова Т.А. Влияние лесного пожара на содержание ртути в дерново-подбурях типичной лесостепи (Воронежская область, Россия) // Трансформация экосистем. 2019. № 2(1). С. 75–85.
3. Abraham J., Dowling K., Florentine S. Effects of prescribed fire and post-fire rainfall on mercury mobilization and subsequent contamination assessment in a legacy mine site in Victoria, Australia // *Chemosphere*. 2018. № 190. P. 144–153.
4. AMAP Assessment 2011: Mercury in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). – Oslo, Norway. 2011. 193 p.
5. Biswas A., Blum J.D., Keeler G.J. Mercury storage in surface soils in a central Washington forest and estimated release during the 2001 Rex Creek Fire // *Science of The Total Environment*. 2008. № 404(1). P. 129–138.
6. Eyrikh S., Shol L., Shinkaruk E. Assessment of Mercury Concentrations and Fluxes Deposited from the Atmosphere on the Territory of the Yamal-Nenets Autonomous Area // *Atmosphere*. 2022. № 13(37). P. 1-16.
7. Friedli H., Arellano A.F., Cinnirella S., Pirrone N. Initial Estimates of Mercury Emissions to the Atmosphere from Global Biomass Burning // *Environmental Science & Technology*. 2009. № 43(10). P. 3507–3513.
8. Giesler R., Clemmensen K.E., Wardle D.A., Klaminder J., Bindler R. Boreal Forests Sequester Large Amounts of Mercury over Millennial Time Scales in the Absence of Wildfire // *Environmental Science and Technology*. 2017. № 51(5). P. 2621–2627.
9. Halbach K., Mikkelsen Ø., Berg T., Steinnes E. The presence of mercury and other trace metals in surface soils in the Norwegian Arctic // *Chemosphere*. 2017. № 188. P. 567–574.
10. Lim A., Jiskra M., Sonke J.E., Loiko S., Kosykh N., Pokrovsky O.S. A revised pan-Arctic permafrost soil Hg pool based on Western Siberian peat Hg and carbon observations // *Biogeosciences*. 2020. №17(12). P. 3083-3097.
11. Loseto, L.L., Siciliano, S.D., Lean, D.R.S. Methylmercury production in high arctic wetlands // *Environ. Toxicol. Chem*. 2004. № 23(1) P. 17–23.
12. Obrist D., Agnan Y., Jiskra M., Hedge C., Colegrove D., Hueber J., Moore C., Sonke J., Helmig D. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution // *Nature*. 2017. № 547. P. 201–204.
13. Olson C., Jiskra M., Biester H., Chow J., Obrist D. Mercury in Active-Layer Tundra Soils of Alaska: Concentrations, Pools, Origins, and Spatial Distribution // *Global Biogeochemical Cycles*. 2018. № 32(7). P. 1058–1073.
14. Riget F., Asmund G., Aastrup P. Mercury in Arctic char (*Salvelinus alpinus*) populations from Greenland // *The Science of the Total Environment*. 2000. № 245. P. 161–172.
15. Schaefer K.M., Elshorbany Y., Jafarov E., Schuster P.F., Striegl R.G., Wickland K.P., Sunderland E.M. Potential impacts of mercury released from thawing permafrost // *Nature Communications*. 2020. № 11(4650). P. 1–6.
16. Schuster P.F., Schaefer K.M., Aiken G.R., Antweiler R.C., Dewild J.F., Gryziec J.D., Gusmeroli A., Hugelius G., Jafarov E., Krabbenhoft D.P., Liu L., Herman-Mercer N., Mu C., Roth D.A., Schaefer T., Striegl R.G., Wickland K.P., Zhang T. Permafrost Stores a Globally Significant Amount of Mercury // *Geophysical Research Letters*. 2018. № 45. P. 1–9.



## ОЦЕНКА ВЫПАДЕНИЯ СУЛЬФАТОВ С АТМОСФЕРНЫМИ ОСАДКАМИ В Г. ИРКУТСК ЗА ПЕРИОД 2013–2020 ГГ.

*Галушин Д.А.<sup>1</sup>, Громов С.А.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт глобального климата и экологии им. академика Ю.А. Израэля, г. Москва,  
galushin2012@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт географии Российской академии наук, г. Москва, gromov@igras.ru

Ежегодно в атмосферу в составе выбросов от антропогенных и естественных источников поступает большое количество загрязнителей. Основными считаются соединения серы и азота, выпадения которых после химических превращений в атмосфере приносят ущерб для окружающей среды. Одним из главных показателей при оценке состояния окружающей среды может быть анализ химического состава атмосферных осадков [1].

В России среди наиболее загрязненных территорий можно выделить южную часть Восточной Сибири, поскольку здесь развивались крупные промышленные центры. Помимо этого, на территории региона есть отдельные участки, удаленные от этих центров, на которых доля загрязнения в химическом составе атмосферных осадков оценивается как минимальная, а это позволяет провести сравнение содержания веществ между «антропогенными» и «естественными» атмосферными осадками. Кроме выбросов промышленности на режим и интенсивность атмосферных осадков в целом, и на их химический состав в частности, будет влиять характерная атмосферная циркуляция и ее вариации, а также особенности орографии местности [2].

Из исследований ученых, которые рассматривали вопросы атмосферной циркуляции Восточной Сибири, следует, что из-за континентальности климата и непростых орографических условий зональная составляющая переноса воздуха проявляется наиболее сильно, чем в остальных районах России. Атмосферная циркуляция будет оказывать влияние на распределение температуры и влажности, что в свою очередь, формирует режим атмосферных осадков. Из наблюдений, проведенных учеными, следует, что основная доля атмосферных осадков выпадает в теплый сезон. В зимний период количество осадков находится в диапазоне от 5 до 20% от годовой суммы осадков, что связано с значительным влиянием Сибирского антициклона [2].

Среди станций атмосферного мониторинга сети ЕАНЕТ станция Иркутск по величине годовых сумм осадков отличается от ст. Монды и Листвянка. В основном различия наблюдаются из-за режима осадков в летний период. За счет недостаточно прогретой поверхности озера Байкал восходящие потоки воздуха, которые создают условия для формирования осадков, не получают своего развития и таким образом годовое количество осадков на станции Листвянка меньше, чем на станции Иркутск (на 10%). На станции Монды осадков выпадает на 30-40% меньше за счет снижения содержания влаги в воздушных массах на протяжении всего года [2].

Химический состав аэрозоля в любом конкретном месте и в любое время определяется его источниками и типом химических превращений, которым подвергается аэрозольное вещество [3].

Основными путями поступления загрязняющих веществ в воздушный бассейн Байкальского региона являются выбросы в атмосферу от стационарных источников.

Практически все тепловые электростанции региона работают на твердом топливе, и на их долю приходится большая часть выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух региона. Основными загрязнителями являются: твердые вещества, диоксид серы и оксиды азота.



Целью исследования заключается в оценке уровней концентраций сульфатов в атмосферных осадках на территории города Иркутска, а также в анализе выпадения сульфатов за период с 2013 по 2020 гг.

Иркутск - крупный город с развитой промышленностью и транспортной сетью. В городе расположены предприятия машиностроения, легкой и пищевой промышленности, крупные ТЭЦ, многочисленные котельные. Немалый вклад в загрязнение воздуха вносят распределенная по территории города эмиссия продуктов сгорания топлива из печных труб домов и от автотранспорта.

Станция мониторинга находится на территории Лимнологического института СО РАН, расположенного на южной окраине города, на левом берегу р. Ангара.

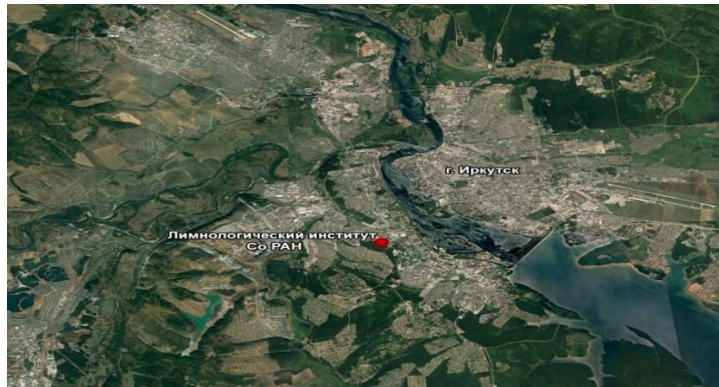


Рисунок 1. Расположение станции химического содержания осадков в г. Иркутск.

С 1999 г. на станции ЕАНЕТ Иркутск отбор проб химического содержания осадков производится непрерывно, по программе ежедневного мониторинга.

Для определения химического состава растворимой фракции аэрозольного вещества применяется комплексный подход, который заключается в использовании современных методов: высокоэффективной жидкостной хроматографии и спектрофотометрии. Для определения концентраций сульфатов в аналитической лаборатории применяют метод ионной хроматографии.

Для исследования динамики концентрации сульфатов в атмосферных осадках Иркутска нами была собрана информация о результатах измерений содержания сульфатов в осадках за 2013-2020 годы.

Средневзвешенную за год величину рассчитывают с учетом месячных сумм осадков, а на станциях с недельным отбором – средняя за месяц величина взвешивается по сумме осадков за неделю. В обоих случаях используют соотношение

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n c_i * q}{\sum_{i=1}^n q}$$

где  $C$  - средневзвешенная за год или за месяц концентрация компонента, мг/л;  $c_i$  - концентрация компонента в месячной или недельной пробе, мг/л;  $q_i$  - сумма осадков за месяц или за неделю, мм;  $n$  - число месяцев или недель.

Выпадение элементов с осадками из атмосферы рассчитывают по формуле:

$$P = \sum_{i=1}^n C_i * q_i$$

где:  $P$  - величина влажного выпадения, мг/м<sup>2</sup> • год;  $C$  - концентрация серы или азота, мг/л;  $q_i$  - месячная сумма осадков, мм;  $n$  - число месяцев в году с осадками.

Основными источниками антропогенного загрязнения на территории Иркутска являются предприятия топливной энергетики, работа промышленных предприятий и котельных, автотранспорт. Большинство выбросов наблюдается в слое ниже 20 метров, и в целом их можно отнести к низким неорганизованным источникам загрязнения.

Химический состав осадков значительно зависит как от характера поступления загрязнения, так и проявления климатических условий, которые «благоприятно» влияют на накопление загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы. В районе исследования преобладающими направлениями ветра являются юго-восточный и северо-западный, которые способствуют приносу примеси от промышленных предприятий, расположенных на юге и севере Иркутска, а также из других районов Иркутской области (Ангарск, Байкальск, Саянск). Весной возрастает накопление сульфатов в атмосфере из-за сравнительно малого количества выпадающих осадков.

В среднем за период с 2013 по 2020 гг., в атмосферных осадках Иркутска содержание сульфатов составило 3,8 мг/л, при средней сумме осадков в 456 мм. Максимальные концентрации наблюдались в начале периода (2013 – 2015 гг.) – 5,1 – 5,7 мг/л.

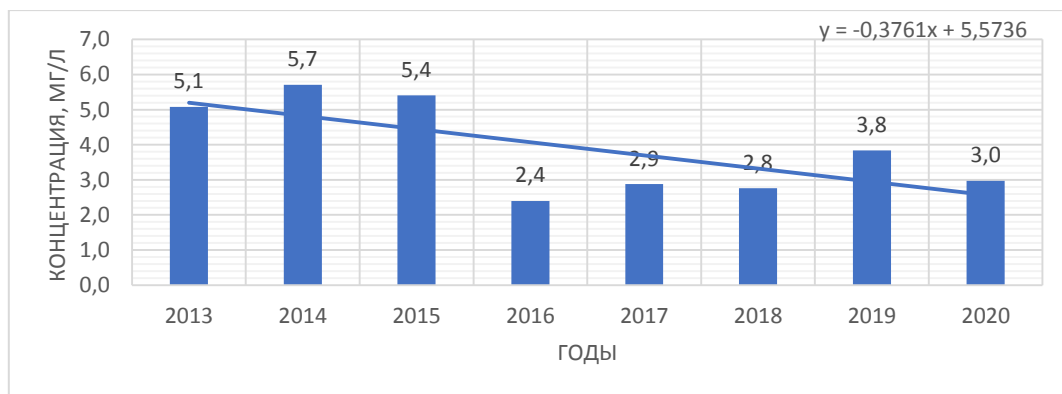


Рисунок 2. Многолетняя динамика средневзвешенных среднегодовых концентраций сульфатов станции Иркутск.

Однако с 2016 года концентрации резко снизились, и как правило не превышают значение в 3,0 мг/л, кроме 2019 г., когда на станции ХСО Иркутск было зафиксировано 3,8 мг/л (рис. 2).

Уменьшение концентрации можно связать с постепенным переходом теплоэнергостанций, которые используют уголь в качестве топлива, на сжигание газа, а также с закрытием ряда предприятий и модернизацией существующих объектов промышленности.

Выпадение сульфатов с атмосферными осадками, как мы рассмотрели ранее, зависит от двух параметров: сумма осадков и концентрация. И если концентрации в городе снижаются, то осадки, вероятно за счет глобального потепления, увеличиваются. Так в 2013 году, сумма осадков в Иркутске составила 330 мм, а уже к 2020 году сумма осадков была на уровне 557 мм. При этом, за счет низких концентраций, которые наблюдались в регионе с 2016 года, увеличение выпадения сульфатов не наблюдалось. Сравнивая 2013 и 2020 гг. (рис.3) можно заметить, что годовые суммы выпадений практически одинаковые (1675 – 1655 мг/м<sup>2</sup>). После максимальных значений в 2014 и 2015 гг. выпадение сульфатов в последующие годы снижались вплоть до 2018 гг. Затем произошло увеличение выпадения, связанное с повышенными уровнями концентрации сульфатов в осадках. Однако по линии тренда мы можем видеть незначительное снижение выпадения сульфатов в городе за этот период.

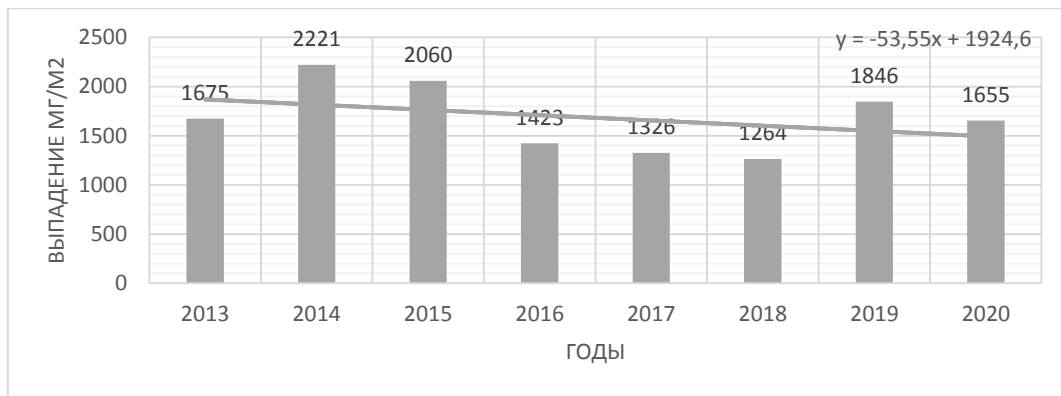


Рисунок 3. Многолетняя динамика выпадения сульфатов с атмосферными осадками на станции Иркутск.

По результатам исследования было выявлено следующее:

1. Концентрации сульфатов в атмосферных осадках Иркутска с 2016 года резко снизились (почти в 2 раза). Это связано с постепенным переходом теплоэлектростанций, которые используют уголь в качестве топлива, на использование газа, а также закрытием ряда предприятий и модернизацией существующих объектов промышленности.

2. Несмотря на увеличение количества осадков в регионе, общее выпадение также имеет тенденцию к снижению, однако это не так очевидно, поскольку выпадения зависят как от концентраций, так и от суммы осадков.

Исследование выполнено в рамках темы НИОКТР АААА-А20-120013190049-4 «Развитие методов и технологий мониторинга загрязнения природной среды вследствие трансграничного переноса загрязняющих веществ (ЕЭК ООН: ЕМЕП, МСП КМ) и кислотных выпадений в Восточной Азии (ЕАНЕТ)».

1. Кислотные дожди / Израэль Ю.А., Назаров И.М., Прессман А.Л. и др. - Л.: Гидрометеиздат, 1989. - 243 с.

2. Результаты многолетних исследований кислотных выпадений в районе Южного Байкала / В. А. Оболкин, О. Г. Нецветаева, Л. П. Голобокова [и др.] // География и природные ресурсы. – 2013. – № 2. – С. 66-73.

3. Особенности химии атмосферных осадков станций Листвянка (Иркутская область) и Приморская (Приморский край) в 2005–2011 гг. / О. Г. Нецветаева, Е. В. Чипанина, В. А. Оболкин [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26, № 6. – С. 466-471.

## ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РАСТЕНИЯМИ ПОСТПИРОГЕННЫХ БОЛОТ

Гашкова Л.П.

Сибирский институт сельского хозяйства и торфа, г. Томск, gashkova-lp@rambler.ru

Пожары на осушенных болотах возникают как следствие понижения уровня болотных вод, чаще всего в результате деятельности человека. В результате воздействия пирогенного фактора меняются физические и химические свойства почвы (Калов, 2022), что приводит к изменению биогеохимических циклов. Последствия пожаров в различных ландшафтах сохраняются длительное время, до 200 лет (Мергелов, 2015).

Цель данной работы заключалась в определении элементов, индицирующих постпирогенные изменения интенсивности поглощения элементов растениями.

Исследования проводились на трёх верховых болотных массивах, два из которых расположены в таёжной зоне и один в лесотундре (таблица 1).

**Таблица 1. Объекты исследования.**

Расположение болота	Код участка		Год выгорания	Координаты	Антропогенная нагрузка
	Фоновый	Постпирогенный			
Междуречье Бакчара и Чаи	ВВ	ВФ	2016	56°53' с.ш. 82°41' в.д.	Осушение
Терраса р. Бакчар	УВВ	УВФ	2014	57°35' с.ш. 82°16' в.д.	Осушение
Междуречье Пура и Надыма	РВ	РФ	2016	65°52' с.ш. 74°58' в.д.	Нефтегазодобыча

На точках ВФ и УВФ полностью выгорел древесный и травяно-кустарничковый ярус, моховой ярус выгорел в понижениях, на кочках сохранился, но погиб. На участке РФ выгорание более значительное, от огня пострадала не только растительность, но и верхняя часть торфа.

На каждом участке отбирались пробы растений (*Sphagnum fuscum*, *Chamaedaphne calyculata* на всех участках, *Pinus sylvestris* на всех, кроме РВ и РФ), верхнего слоя торфа (непосредственно возле отобранных растений) и подстилающей породы. Пробы отбирались с площадок 10 на 10 м, с 10 растений каждого вида. Отобранные образцы проанализированы на содержание Na, Mg, P, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd и Pb. Для выявления воздействия пожара на изменение биогеохимических процессов, для каждого участка болота вычислялись и сравнивались: коэффициент биологического поглощения (КБП), (отношение содержания элемента в золе растения к его содержанию в торфе); биогеохимическая активность вида (БХА), (сумма коэффициентов биологического поглощения); относительная биогеохимическая активность видов (отн. БХА), (отношение БХА на нарушенных участках к БХА на естественных участках).

При рассмотрении полученных нами данных по концентрации элементов в каждом из видов отдельно, прослеживаются отличия как в содержании элементов, так и в интенсивности их поглощения. Элементами, которые на примере *S. fuscum* индицируют постпирогенные участки, оказались Mn, Cd и Zn. Содержание данных элементов в *S. fuscum* на фоновых участках ниже, чем на постпирогенных. Содержание элементов Ca, Fe, P и Cu в *S. fuscum* выше на постпирогенных участках ВФ и УВФ, в то же время как на

самом северном из рассмотренных болот в междуречье Пура и Надыма концентрация данных элементов выше на фоновом РВ. Кроме того, на РВ содержание в *S. fuscum* Na, K, Pb и Mg также выше на фоновом участке, хотя на остальных болотах различий между участками не наблюдается. Участки UBB и UBF отличаются от остальных болот более низкой концентрацией Cd в *S. fuscum* на постпирогенном участке, в сравнении с естественным.

Индикаторами недавнего пожара для *C. calyculata* можно считать такие элементы, как Zn, Pb, Cd, Mg и P. Содержание их в *C. calyculata* выше на постпирогенных участках. Концентрация остальных элементов: Cu, Fe, Mn, K, Ca и Na в *C. calyculata* не зависит от пирогенной нагрузки. Наиболее характерной особенностью северных участков РВ и РВ оказалось увеличенная, по сравнению с другими участками, концентрации в *C. calyculata* Pb, Cd, Fe и Na и более низкое содержание P, K, Ca и Mn. Разница в содержании элементов значительная, например, содержание Na на участке РВ больше в 25 раз, чем на UBB. Такая особенность северных участков объясняется спецификой тундровых ландшафтов, характеризующихся слабым накоплением и разложением органических остатков, что и приводит к дефициту P, K, Ca и Mn. Высокая концентрация Fe, являющегося здесь типоморфным элементом, тоже вполне объяснима, но накопление *C. calyculata* Pb, Cd, и Na вероятно вызваны антропогенным влиянием.

Образцы *P. sylvestris* для анализа не отбирались на РВ и РВ, где этот вид не встречается. Содержание большинства элементов на остальных четырёх исследованных участках значимо не различается. Исключением является низкая концентрация Fe на ВВ и высокая концентрация Cu и Cd на UBF.

КБП Mn у *S. fuscum* выше на всех постпирогенных участках, и такая закономерность наблюдается только у данного вида. Сравнение КБП показывает, что интенсивность поглощения Ca, Fe и Cu коррелирует с содержанием элементов в *S. fuscum*, и также отличается на более северных участках. КБП Na и Pb у *S. fuscum* на точке РВ в 2-3 раза выше, чем на аналогичных участках ВВ и UBF. Для фоновых участков разница составляет более 10 раз. Интенсивность поглощения Cd, Mn, Ca, K и P на северных участках у *S. fuscum* ниже от 5 (P) до 39 раз (Mn), чем на других участках (рисунок 1).

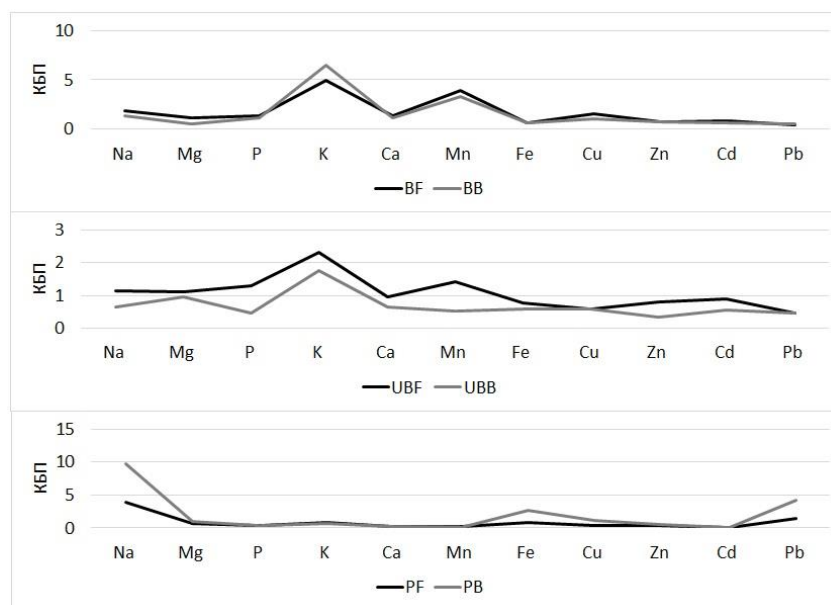


Рисунок 1. Сравнение коэффициентов биологического поглощения *S. fuscum*.

Несмотря на то, что концентрация Zn, так же, как и в случае со *S. fuscum*, в тканях *C. calyculata* на всех постпирогенных участках выше, по сравнению с фоновыми, КБП

Zn на выгоревшем участке превышает фоновые значения только на UBF. КБП Mn на фоновых участках ВВ и ВФ выше, чем на всех постпирогенных. Интенсивность поглощения P, Pb и Mg для *C. calyculata* выше на постпирогенных участках, за исключением КБП Pb на UBF и Mg на PF, где различия незначимы. Для северных участков характерно увеличение КБП Pb, Cd, Fe и Na и уменьшение КБП P, K, Ca и Mn, по сравнению с более южными участками. Высокие КБП в данном случае говорят о том, что данные элементы находятся в доступной для растений форме и легко поглощаются *C. calyculata* (рисунок 2). Накопление растениями Cd и Pb на данной территории уже отмечалось ранее (Московченко, Романенко, 2022).

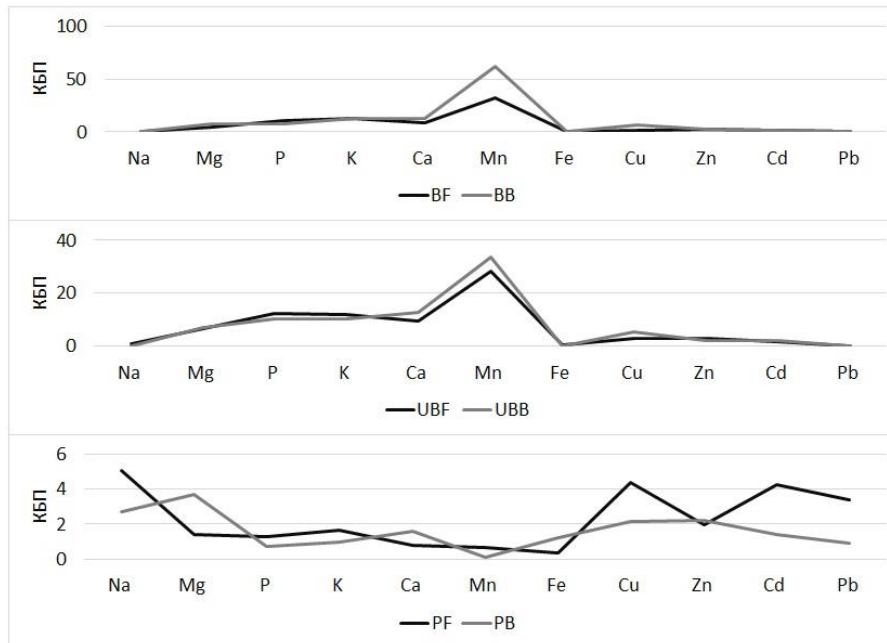


Рисунок 2. Сравнение коэффициентов биологического поглощения *C. calyculata*.

Для *P. sylvestris* по большинству элементов не обнаружено достоверных различий в интенсивности их поглощения, только КБП Mn, как и для *C. calyculata*, выше на фоновых участках. Точка UBF отличается от остальных более высоким КБП элементов Cu и Cd (рисунок 3).

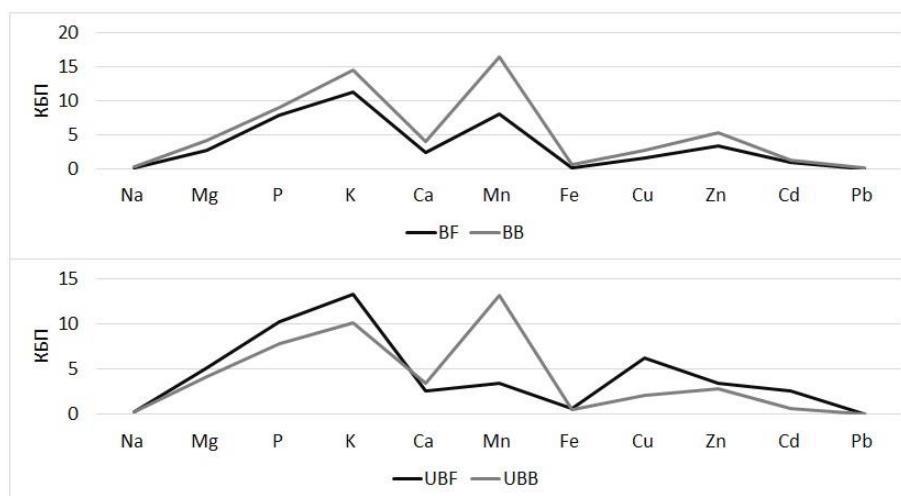


Рисунок 3. Сравнение коэффициентов биологического поглощения *P. sylvestris*.

БХА *S. fuscum* выше фона только на UBF. БХА *C. calyculata* по отношению ко всем рассмотренным элементам не показала увеличения на постпирогенных участках, но отражает региональные особенности и значительно ниже ПФ и РВ, по сравнению с другими болотами. Уровень БХА *P. sylvestris* для исследованных элементов также не показал значимых различий между участками.

Уровень относительной БХА больше 1 указывает на увеличение биогеохимической активности на постпирогенных участках. *S. fuscum* показал уровень отн. БХА больше 1 на участках UBF1 и BF5. На ПФ уровень данного коэффициента оказался самым низким, и не достигает 1. Таким образом, *S. fuscum* активнее поглощал элементы на фоновом участке РВ, чем на ПФ. Данное соотношение сохраняется при рассмотрении отдельно отн. БХА сидерофильных, литофильных и халькофильных элементов.

Отн. БХА *C. calyculata*, наоборот, превышает 1 только на ПФ. Однако, при рассмотрении элементов отдельно, отн. БХА Fe на этом участке резко отличается от остальных элементов, и составляет всего 0,3.

Отн. БХА *P. sylvestris* на BF меньше 1, а на UBF больше. Отн. БХА сидерофильных, литофильных и халькофильных элементов больше на UBF в 3; 1,4 и 5 раз соответственно.

Анализ концентрации элементов в растениях по всем данным со всех исследованных участков показал, что наиболее значимые различия наблюдаются между видами растений, менее значимые между регионами и незначимые между участками, независимо от пирогенной нагрузки. Поэтому сравнивался каждый вид на определенном участке отдельно.

Таким образом, можно сделать вывод, что видовые различия в концентрации элементов наиболее сильно выражены в относительно высоком содержании Pb, Na и низком Ca и P в тканях *S. fuscum*. *P. sylvestris* накапливает Zn и содержит Fe меньше, чем у других видов, *C. calyculata* содержит больше Mn и меньше Pb, чем *S. fuscum* и *P. sylvestris*. Региональные особенности выражаются в основном в отличии наиболее удалённых северных участков РВ и ПФ. Если рассматривать все исследованные растения, то северные участки отличаются тем, что на них растения накапливают достоверно больше Pb, Fe, Mg, Na и меньше Mn, Ca и P, чем на южной территории. Наибольшие региональные различия обнаружили в содержании и интенсивности поглощения элементов *C. calyculata*. На северных участках она интенсивнее поглощает и накапливает больше Pb, Cd, Fe и Na и меньше P, K, Ca и Mn.

Индикатором постпирогенных участков является повышенное содержание в *S. fuscum* Mn, Cd и Zn, и накопление в тканях *C. calyculata* элементов Zn, Pb, Cd, Mg и P.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 22-77-10024.

1. Калов, Р. О. Постпирогенная трансформация почв в пределах лесных экосистем / Р. О. Калов // Вестник МАНЭБ. – 2022. – Т. 27, № 4. – С. 35-39. – EDN MNROYJ.

2. Московченко, Д. В. Биогеохимические особенности ландшафтов Надымского района ЯНАО / Д. В. Московченко, Е. А. Романенко // Вестник Нижневарттовского государственного университета. – 2022. – № 4(60). – С. 122-136. – DOI 10.36906/2311-4444/22-4/12. – EDN GKTROC.

3. Мергелов, Н. С. Постпирогенная трансформация почв и запасов почвенного углерода в предтундровых редколесьях Колымской низменности: каскадный эффект и обратные связи / Н. С. Мергелов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – № 3. – С. 129-140. – EDN UAFQKN.



## ВЫРУБКИ И ГАРИ ХИБИН КАК ТЕРРИТОРИИ ЛОКАЛЬНОГО ФАУНИСТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ

Зенкова И.В.<sup>1</sup>, Дитц А.А.<sup>2</sup>, Нехаева А.А.<sup>3</sup>, Юсупов З.М.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, г. Апатиты,  
i.zenkova@ksc.ru

<sup>2</sup>Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар, kolesnikova@ib.komisc.ru

<sup>3</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва,  
adrealinea@gmail.com

<sup>4</sup>Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН, г. Нальчик,  
yzalim@mail.ru

Хибины – заполярный горный массив, не имеющий аналогов по сочетанию геологического строения, сложного пересеченного рельефа, горного микроклимата и высотной поясности почвенно-растительного покрова. При относительно небольших предельных высотах (1000–1200 м над ур.м.) около 40% горного ландшафта занимают безлесные тундры (19%) и холодные каменистые гольцовые пустыни (20%), треть – берёзовые криволесья и редколесья, еще треть – таежные леса, в том числе старовозрастные 200–250-летние: 13% – сосновые, 8 – мелколиственно-хвойные, 7 – еловые (Алексеев и др., 2021). Сопоставимую с горно-еловыми лесами площадь (5%) составляют территории Хибин, нарушенные деятельностью горнодобывающих предприятий и значительной рекреационной нагрузкой.

К числу негативных последствий промышленной деятельности относится рубка леса в межгорной долине реки Кунийок на севере Хибин летом 2012 г. на площади более 100 га под строительство обогатительной фабрики и возникший на ней летом 2013 г. низовой пожар общей площадью 8 га, уничтоживший и часть исходного горного сосняка. Для экологического мониторинга за состоянием нарушенного почвенного покрова и населяющей его фауны беспозвоночных, нами были выбраны две пары площадок по принципу «горелый–негорелый»: контрольный и горелый сосняки (С и ГС), горелая и не затронутая пожаром вырубка (В и ГВ). Характеристика площадок и результаты мониторинга почвенных температур, макрофауны и микробиоты, проведенного в 2015, 2018 и 2021 гг., т.е. спустя 2–3, 5–6 и 8–9 лет после воздействия, опубликованы ранее (Зенкова, 2016; Зенкова и др., 2018, 2020, 2022; Зенкова, Штабровская, 2022; Штабровская, Зенкова, 2022а,б; Zenkova, Filippov, 2019; Zenkova et al., 2021). В настоящем сообщении на примере доминирующих таксонов членистоногих (пауков, муравьев и жуков стафилинид) мы акцентируем внимание на привлечении вырубками и гарями видов беспозвоночных, не характерных для достаточно хорошо изученной локальной фауны этого заполярного горного массива.

В долине Кунийок выявлен 61 вид, принадлежащий к 41 роду и 12 сем. при наибольшей представленности сем. Linyphiidae (30 видов), Lycosidae (10) и Gnaphosidae (8) и количественном преобладании пауков двух первых семейств. Общими для двух пар мониторинговых площадок, заложенных на удалении 1 км, были лишь 8 видов из 61 (или 13%), среди них североευропейско-транссибирский борео-монтанный вид *Pardosa lasciva*, отловленный в количестве 17 экз., указывается для Хибин впервые.

Еще 7 видов впервые приводятся для Хибин с трех нарушенных территорий и один (линифида *Agyneta subtilis*) – из контрольного сосняка. В ГС отловлены линифида *Helophora insignis* и гнатофозида *Gnaphosa montana*, в ГС и на В – миметида *Ero furcata*, на ГВ – линифида *Leptothrix hardyi*, ликозида *Acantholycosa lignaria* и гнафозиды *Gnaphosa sticta* и *Micaria silesiaca*. Находка (2 экз.) ксерофильного и термофильного ев-



ропейско-западносибирского вида *Micaria silesiaca* на дважды нарушенной горелой вырубке соответствует наибольшему прогреву (до +29,8 °С) и низкой влажности (до 30%) эродированного почвенного покрова этой площадки в летний период (Зенкова, Штабровская, 2022; Штабровская, Зенкова, 2022) и является первой для Кольского полуострова.

Суммарно на нарушенных территориях (*ГС*, *В*, *ГВ*) выявлено 58 видов из 40 родов и 12 сем., что составляет 34% от списка пауков Хибин, ранее включавшего 161 вид из 98 родов и 17 сем. (Nekhaeva, 2015) и теперь расширенного до 169 видов. Высоким разнообразием отличался горелый сосняк: 41 вид из 30 родов и 10 сем. против 28 видов из 24 родов и 7 сем. в соседнем контрольном сосняке. В *ГС* собрано наибольшее число уникальных видов, не встреченных на других площадках: 13 против 3-х в контрольном *С*. Обе вырубки при сходном числе таксонов (24–25 видов из 18–20 родов и 7 сем.) уступали лесным биотопам; число уникальных видов было выше на *ГВ* (8).

Все нарушенные биотопы отличались от исходного сосняка повышенным разнообразием и обилием не строящих ловчих сетей пауков охотников (сем. Lycosidae, Gnaphosidae) и засадников (Thomisidae). Доминирующие виды ликозид – дневные хищники *Pardosa palustris*, *P. hyperborea*, *P. eiseni* не обнаружены вне нарушенных биотопов, а находки *P. lugubris*, *Psammittis sabulosus* и *Agroeca proxima* за их пределами единичны. Перечисленные виды рода *Pardosa* в заполярных Хибинах, как правило, населяют открытые пространства березовых криволесий и горных тундр. Пауки-тенетники (Linyphiidae), обильные в исходном сосняке, в биотопах с трансформированной подстилкой были более разнообразны, но не достигали контрольных значений численности.

Прослежена нарастающая в соответствии со степенью нарушенности территории смена доминирования лесных видов линифид активными дневными хищниками – ликозидами родов *Pardosa*, *Alopecosa* и *Xerolycosa*: в исходном сосняке преобладали связанные с лесной подстилкой линифиды *Hilaira herniosa*, *Tenuiphantes tenebricola*, *T. alacris*, *Centromerus arcanus*; в *ГС*, наряду с *T. tenebricola* и *C. arcanus*, доминантом стал один вид ликозид – *P. lugubris*, на вырубках – уже по 5 видов (*P. hyperborea*, *P. eiseni*, *P. palustris*, *A. aculeata*, *A. pinetorum* и *X. nemoralis*).

В долине Кунийок выявлен 41 вид из 23 родов и 8-ми подсем., в т.ч. 40 видов – на трех нарушенных площадках. Многовидовыми были подсем. Aleocharinae (12 видов), Tachyporinae (8), Omaliinae (7) и Staphylininae (6), преобладающие по числу видов в стафилинидофауне Хибин и северных регионов в целом. На вырубках и гарях было сконцентрировано от 28 до 40% видового состава этих подсемейств, известного для Хибин. Подсем. Euaesthetinae, Oxytelinae и Proteininae, представленные в Хибинах одним–двумя видами, в долине Кунийок не обнаружены.

Девять видов из родов *Tachinus* (*T. humeralis* (Gravenhorst, 1802)), *Oxyroda* (*O. alternans* (Gravenhorst, 1802)), *Stenus* (*S. biguttatus* (Linne, 1758), *S. tarsalis* (Ljungh, 1810)), *Philonthus* (*Ph. cephalotes* (Gravenhorst, 1802), *Ph. politus* (Linnaeus, 1758)), *Quedius* (*Q. boops* (Gravenhorst, 1802), *Q. limbatus* (Heer, 1834)) и вид подсем. Scaphydiinae (*Scaphisoma agaricinum* (Linnaeus, 1758)) ранее не указывались для массива, хотя последний вид мог быть отмечен в фаунистических списках Хибин как представитель сем. Scaphydiidae. Таким образом, локальная стафилинидофауна массива расширена до 127 видов, из которых 32% отмечены на вырубках и гарях.

Как и в случае с пауками, большинство новых видов (7) выявлено на гарях (5 – в *ГС*, 1 – на *ГВ*, 2 – на обеих площадках), а наибольшими показателями таксономического разнообразия, обилия стафилинид и числа уникальных видов (13) отличался *ГС*. Здесь учтено 34 вида из 17 родов и 7 подсем. (против 15–16 видов в контрольном *С* и на *В*) при наибольшем среди площадок разнообразии подсем. Aleocharinae, Tachyporinae, Staphylininae, Steninae и Xantholininae. Только в *ГС* выявлены новые для Хибин активно летающие жуки рода *Philonthus* (Staphylininae). К влажной подстилке *ГС* были приурочены

все найденные в долине гигромезофильные виды (*Olophrum boreale*, *Stenus palustris*, *S. biguttatus*, *S. tarsalis*, *Lathrobium brunnipes*), тогда как подавляющее большинство остальных видов по отношению к влажности являются мезофилами.

Комплекс стафилинид нарушенной два года подряд *ГВ* был самым бедным: 11 видов из 10 родов и 5 подсем., т.е. каждый род был представлен единственным видом. В то же время только здесь были отловлены 3 экз. нового для Хибин вида *Scaphisoma agaricinum*.

Все виды стафилинид в долине Кунийок относятся к трофической группе зоофагов. По биотопической приуроченности это либо лесные подстилочные виды, либо эвритопные, населяющие лесные и тундровые пояса Хибин. Равное соотношение этих групп в контрольном сосняке (по 50% видов) на нарушенных территориях было смещено в сторону эвритопных видов, доля которых возросла до 59% в лесном биотопе (*ГС*) и до 63% на открытой вырубке (*В*).

Из двух десятков видов муравьев, известных для Хибин (Zenkova et al., 2021), в долине Кунийок выявлены 10 видов из 4-х родов 2-х подсем. (6 видов подсем. *Formicinae* и 4 – подсем. *Myrmicinae*) при их большем разнообразии на вырубках: 7–8 видов против 3-х в контрольном *С* и 5-ти в *ГС*. Общими для 4-х площадок были только два бореальных мезофильных вида: эвритопный, повсеместно распространенный в Хибинах *Myrmica lobicornis*, и, напротив, редкий, северный лесной *Formica aquilonia*. Этот тенелюбивый обитатель хвойных лесов (умброфил) сформировал многотысячные поселения на площадках с мощной влажной мохово-лишайниково-кустарничковой подстилкой (*С*, *ГС*, *В*) и был наиболее обильным на вырубке и единичным – на соседней *ГВ* с эродированным почвенным покровом.

В отличие от контрольного *С*, на нарушенных площадках были отловлены единичные особи 5-ти лесных видов: на двух гарях (*ГВ* и *ГС*) – крупный дендробионт *Camponotus herculeanus*, обитающий под корой и в разлагающейся древесине, и *Formica fusca*, известный для Хибин по литературным источникам (Фридолин, 1936), но не выявленный нами за пределами гарей; на *В* – обычный в Хибинах *Formica gagatoides* (единственный приполярный вид формицин); на *ГВ* – редкий в Хибинах лесной холодо- и тенелюбивый *Formica lugubris*; на обеих вырубках – мелкий подкорный дендробионт *Leptothorax acervorum*. Обе вырубki, заваленные стволами, с редкой порослью березы, привлекали два лесных вида муравьев, *Myrmica sulcinodis* и *Formica lemani*, населяющих в Хибинах преимущественно пояса березовых криволесий и горных тундр.

За исключением умброфилов *F. aquilonia* и *F. lugubris*, известных в Хибинах по единичным местообитаниям (оба вида включены в Международную Красную книгу (МСОП, 1996)), на нарушенных территориях не выявлены стенотопные виды, изредка встречающиеся в Хибинах: тене- и влаголюбивые *Myrmica rubra* и *Formica forsslundi*, термо- и фотофильные *Formica sanguinea* и *Formica truncorum*, европейско-сибирский лесной *Formica polyctena* и борео-альпийский *Formica sueticica*.

Таким образом, по итогам зоологического мониторинга трех вариантов антропогенной трансформации горно-таежного леса в долине Кунийок локальная фауна Хибин дополнена девятью видами пауков и девятью видами стафилинид что составляет 5 и 7% видового разнообразия каждого из этих таксонов. Сходным числом видов пополнилась и локальная фауна жуужелиц Хибин (Coleoptera, Carabidae), большинство из которых было выявлено на гарях (Zenkova, Filippov, 2019). Горные вырубki и гари привлекают виды с разными предпочтениями (пирофильные, свето- и теплолюбивые, и, напротив, холодо- и тенелюбивые, а также редкие охраняемые), в том числе – нехарактерные для Хибин, обогащая локальную фауну этого заполярного массива и Мурманской области в целом и расширяя представления об особенностях экологии беспозвоночных на северной периферии ареала. При низких темпах самовосстановления нарушенных территорий в

специфических условиях горного микроклимата, эффект привлечения таких видов фауны сохраняется на протяжении не менее десятка лет.

1. Алексеенко Н.А., Королева Н.Е., Волкова А.А. Изучение закономерностей распределения растительного покрова Хибинского горного массива с помощью картографического метода // Труды Кольского НЦ РАН. 2021. № 7. С. 79–87.

2. Зенкова И.В. Почва и почвенная фауна пирогенного леса: последствия низового пожара в Хибинском горном массиве // Почвоведение – продовольственной и экологической безопасности страны: тез. Докл. VII съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева. Москва-Белгород: «Белгород», 2016. Ч. I. С. 221–222.

3. Зенкова И.В., Штабровская И.М. Влияние гидротермических условий на подстилочных беспозвоночных вырубках и гарей Хибин // Лесоведение. 2022. № 4. С. 364–380. Doi: 10.31857/S0024114822030123.

4. Зенкова И.В., Колесникова А.А., Филиппов Б.Ю. Жесткокрылые (Coleoptera: Carabidae, Staphylinidae) пирогенного леса в Хибинском горном массиве // XVIII Всероссийское совещание по почвенной зоологии. – М.: КМК, 2018. С. 91–92.

5. Зенкова И.В., Штабровская И.М., Усова Д.В. Почвенная фауна вырубках и гарей Хибин // Вестник Мурманского гос. техн. Ун-та. Сер. Биологические науки / Науки о Земле. 2020. Т. 23. № 2. С. 160–172. Doi: 10.21443/1560-9278-2020-23-2-160-172.

6. Зенкова И.В., Сошина А.С., Корнейкова М.В., Фокина Н.В. Микробиологические показатели почв на вырубках и гарях Хибин // Научные основы устойчивого управления лесами. М.: ЦЭПЛ РАН. 2022. С. 272–274.

7. Фридолин В.Ю. Животно-растительное сообщество горной страны Хибин. М.-Л.: изд. АН СССР. 1936. 293 с.

8. Штабровская И.М., Зенкова И.М. Мониторинг температуры подстилок на вырубках и гарях Хибин // Научные основы устойчивого управления лесами. М.: ЦЭПЛ РАН. 2022а. С. 294–297.

9. Штабровская И.М., Зенкова И.В. Летние температуры почвенных профилей на вырубках и гарях Хибин // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022б. № 19. С. 418–423. doi: 10.31241/FNS.2022.19.076.

10. IUCN Red List of Threatened Species in 1996. 2022. Ver. 2. Available online: <https://www.iucnredlist.org/species/8642/12924300> (accessed on 10.09.2023).

11. Nekhaeva A.A. An annotated check-list of spiders (Arachnida: Aranei) of the Khibiny Mountains, Kola Peninsula // Arthropoda Selecta. 2015. Vol. 24. № 4. P. 451–472.

12. Zenkova I., Filippov B. The ground beetles fauna (Coleoptera, Carabidae) of natural and anthropogenic habitats in Khibiny polar mountain massif // 8th International Symposium of Ecologists – ISEM8: The Proceeding (Ed. V. Pešić). Podgorica, Institute for Biodiversity and Ecology. 2019. P. 121–129.

13. Zenkova I.V., Yusupov Z.M., Shtabrovskaya I.M. The Ants Database of the Khibiny Polar Mountains // 1st International Electronic Conf. on Entomology (IECE–2021). The Proceedings. MDPI: Basel, Switzerland, 2021. Vol. 68. P. 1–7. <https://sciforum.net/manuscripts/10502/manuscript.pdf>. doi:10.3390/IECE-10502.

## **КАРТИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ КАНАВ В РАМКАХ СФАГНОВОГО МОНИТОРИНГА НА КАРБОНОВОМ ПОЛИГОНЕ «РОСЯНКА»**

*Карелина В.И., Напреенко М.Г.*

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград,  
VKarelina@stud.kantiana.ru, maxnpr@gmail.com

На территории Калининградской области существуют как естественные болотные экосистемы, так и сильно нарушенные в ходе торфоразработок торфяники. Одним из них является торфяник Виттгирренский, на котором располагается сухопутная площадка карбонового полигона «Росьянка» [1,2]. Осушение болотных территорий приводит к уничтожению торфообразующей растительности и к высоким показателям выбросов парниковых газов, а также увеличивает риск возникновения торфяных пожаров, что в свою очередь сопровождается дополнительным интенсивным выделением углеродных соединений и вредных веществ в окружающую среду [3].

Для эффективной реабилитации таких территорий критически важно понимать изменения в составе растительности и связанных с ней параметров окружающей среды. Одним из важных факторов восстановления торфяников является мониторинг состояния растительных сообществ на них. В этом контексте, сфагнум, как типичное болотное и основное торфообразующее растение, представляет особый интерес, так как его динамику можно использовать для отслеживания процесса восстановления экосистемы.

В качестве эдификатора, сфагнум играет важную роль в поддержании условий водообеспечения болотных территорий. Однако условия для роста сфагнов являются неблагоприятными на нарушенных торфяниках, где уровень болотных вод сильно понижен [4]. Здесь они произрастают преимущественно в достаточно глубоких понижениях, в частности, в мелиоративных канавах, которые можно назвать своеобразными «рефугиумами сфагнов» на пространстве сильно осушенного торфяного субстрата.

В рамках программ по реабилитации болотных экосистем, роль сфагновых рефугиумов оказывается весьма значимой, при этом большую роль играет также наблюдение за изменениями видового состава как сфагновых мхов, так сфагнобионтов – связанных со сфагнами топически мелких организмов: раковинных амёб, диатомовых водорослей, ветвистых ракообразных, водяных клещей и другие [5]. Комплекс таких исследований на карбоновом полигоне нами определён как «сфагновый мониторинг».

Одним из основных факторов, влияющих на состояние и распространения сфагновых мхов, является колебание уровня болотных вод на торфянике [6]. Диапазон этих колебаний оказывает существенное воздействие на распространение растительности. Сбор и анализ данных о диапазоне изменения уровня воды также входит в число задач при «сфагновом мониторинге» с целью последующего прогнозирования реабилитации болотных экосистем.

Целью нашего исследования был анализ растительного покрова на основе картирования в двух мелиоративных канавах, типичных для торфяника Виттгирренского (карбонового полигона «Росьянка»), оставшихся после торфоразработок. Одна из данных канав располагается на участке вересковых зарослей с высокой берёзовой порослью, другая – в составе сообщества низкорослой и разреженной берёзовой поросли с пушицей.

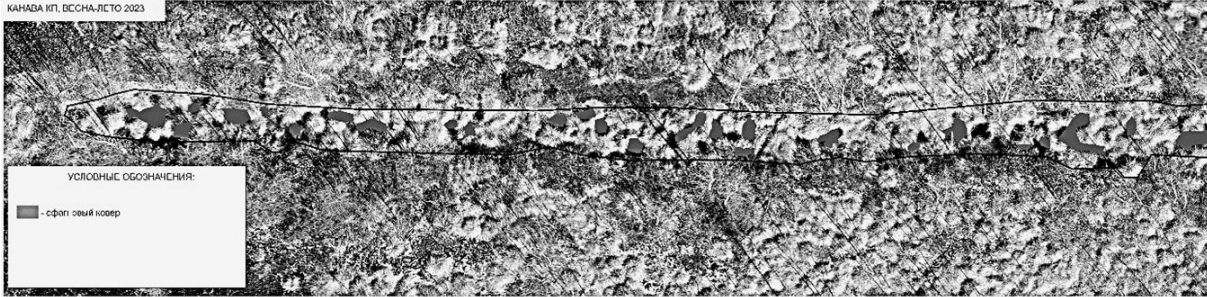
Картирование растительности канав было произведено путём анализа аэрофотоснимков с заверкой на местности. Исходные данные были собраны с использованием беспилотного летательного аппарата. В ходе полевых исследований было проведено описание растительного покрова внутри каждой канавы с учётом его неоднородности: в т.ч. выделены структурные элементы растительности, отражающие микрорельеф участка.

Учитывались гидрологические характеристики: уровень болотных вод и влажность торфяного субстрата (в сухой период), глубина и ширина канав. Такой подход позволил получить более точное представление о структуре и экологическом состоянии исследуемых канав.

Следующим этапом был расчёт процентного соотношения сфагновых мхов в структуре растительного покрова каждой из канав.

Полученные данные позволили установить долю участия сфагновых мхов в растительном покрове каждой из канав, а также соотношение разных структурных элементов в них (табл. 1 и 2).

**Таблица 1. Часть снимка с закартированными структурными элементами в мелиоративной канаве «Пушица».**

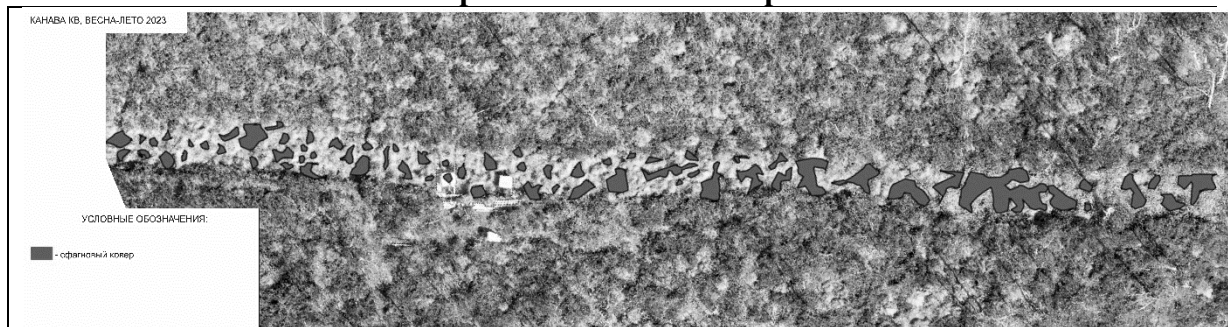


Ширина средняя, м	Площади покрытия сфагновых мхов, %	Структурные элементы растительности
1,2	20	1. Крупные кочки <i>Eriophorum vaginatum</i> с участием (до 5%) других травянистых растений. 2. Сфагновый ковер – в основном из <i>Sphagnum cuspidatum</i> . [7,10] 3. Незанятое растительностью пространство – мертвый очёс или открытый торф на дне канавы. 4. Растительность у борта канавы (<1%)

Изучение мелиоративных канав «Вереск» и «Пушица» показывает различия как в составе растительного покрова, так и в условиях увлажнения [8,9]. В первую очередь, отмечено существенное различие в площади сфагнового ковра – 60% («Вереск») и 20% («Пушица»). Такое различие мы связываем с различиями в диапазоне изменений уровня грунтовых вод и геометрических параметрах канав, что может оказывать влияние на процессы роста и распространения сфагновых мхов [9,10]. Вероятно, определённую роль могут играть различия в подстилающих породах.

Канавы на участке вересковых зарослей обладают более значительными геометрическими параметрами – большей шириной и глубиной, а также более стабильным уровнем грунтовых вод, что создаёт более благоприятные условия для сохранения влажной среды, необходимой для сфагновых мхов. Можно предположить, что данный тип канав на торфянике Виттгирренском обладает более выраженным «рефугиальным потенциалом» для сфагновых мхов и будет способствовать более успешной дальнейшей колонизации данных растений в случае реализации проекта обводнения. Кроме того, в данной канаве были обнаружены другие типично болотные виды: *Drosera rotundifolia*, *Andromeda polifolia*.

**Таблица 2. Часть снимка с закартированными структурными элементами в мелиоративной канаве «Вереск».**



Ширина средняя, м	Площади покрытия сфагновых мхов, %	Структурные элементы растительности
1,8	60	1. Крупные кочки – <i>Eriophorum vaginatum</i> – 85%, <i>Juncus effusus</i> – 15%. 2. Сфагновый ковёр – большей частью из <i>Sphagnum cuspidatum</i> . [7,10] 3. Растительность у борта канавы.

С целью увеличения распространения сфагнов на изучаемом торфянике, рекомендуется проведение следующих мероприятий:

- 1) управление уровнем воды и стабилизация гидрологических условий;
- 2) реабилитация канав с применением методов рекультивации сфагнов;
- 3) применение мер, направленных на снижение конкуренции со стороны других растений для увеличения популяции сфагновых мхов;
- 4) репатриация болотных видов – создание местообитаний с оптимальными условиями для сфагновых мхов и других видов болот.

Распространение сфагновых мхов на осушенных торфяниках тесно связано с условиями среды в конкретном местообитании. Условия мелиоративных канав на торфянике Виттгирренском демонстрируют их разный потенциал в качестве рефугиумов для дальнейшего развития и расселения (реколонизации) сфагнов. Это связано с рядом параметров (геометрия, глубина, уровень грунтовых вод и др.) и определяет применение различных подходов для репатриации сфагновых мхов в рамках программ по восстановлению экосистем торфяников.

Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ по теме № FZWM-2023-0002.

1. Карбоновые полигоны // Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/> (дата обращения: 07.08.2023).

2. Карбоновый полигон «Росьянка». Научно-образовательный проект по изучению климатически активных парниковых газов. URL: <http://rosyanka.kantiana.ru/> (дата обращения: 07.08.2023).

3. Карбоновая ферма на торфянике Виттгирренском // Карбоновый полигон «Росьянка». URL: <http://rosyanka.kantiana.ru/farm> (дата обращения: 10.08.2023).

4. Tanneberger F., Wichtmann W. Carbon credits from peatland rewetting: climate, biodiversity, land use. Stuttgart, 2011.

5. Напреенко М. Г., Самерханова А. К., Анциферова О. А., Напреенко-Дорохова Т. В. Экологическая реабилитация водно-болотных экосистем в рамках функционирования

карбонового полигона в Калининградской области // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность : тез. докл. междунар. науч. конф. Севастополь, 2021. С. 641-642. <https://doi.org/10.21072/978-5-6044865-5-9>.

6. Glime J. M. Bryophyte Ecology. Vol. 1. Physiological Ecology. Ch. 2-5. URL: <http://digitalcommons.mtu.edu/bryophyte-ecology/> (дата обращения: 10.08.2023).

7. Савич-Любичкая Л. И., Смирнова З. Н. Определитель сфагновых мхов СССР. Л., 1968.

8. Напреенко М. Г. Флора и растительность верховых болот Калининградской области : дис. ... канд. биол. наук. Калининград, 2002.

9. Боч М.С., Смагин В. А. Флора и растительность болот Северо-Запада России и принципы их охраны. СПб., 1993.

10. Напреенко М. Г., Разгуляева Л. В. Сфагновые мхи Калининградской области // *Arctoa*. 1999. Vol. 8. С. 27-34.

## АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ГОРОДОВ СИБИРИ

*Леженин А.А., Рапута В.Ф.*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
г. Новосибирск, lezhenin@ommfao.sccc.ru, raputa@sccc.ru

В докладе обсуждаются результаты исследований по выявлению статистических зависимостей между среднемесячными концентрациями бенз(а)пирена (БП), измеренных на постах Росгидромета в городах Ангарске, Усолье-Сибирское, Иркутске, Шелехове. Основой для проведения таких исследований служат данные, получаемые на сети постов Росгидромета, осуществляющих мониторинг загрязнения атмосферы в городах [1 - 4]. Наблюдения проводятся по единой программе. На стационарных постах выполняются регулярные измерения в специальных павильонах.

Следует отметить, что возможности существующих сетей наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха весьма ограничены. Количество действующих постов не позволяет охватить все территории города и детализировать пространственную картину его загрязнения. Также недостаточен объём измеряемых компонентов примесей. В не в полной мере проводится анализ и контроль получаемых данных мониторинга. В связи с этим весьма существенная дополнительная информация о процессах загрязнения может быть получена с применением природных планшетов, в частности, используя методы наземного и спутникового мониторинга загрязнения снежного покрова [5, 6].

В качестве объекта исследований приняты измеренные среднемесячные концентрации БП, представленные на сайте НПО «Тайфун» (<https://www.rpatyphoon.ru>), на постах Росгидромета в городах Ангарске, Усолье-Сибирском, Иркутске, Шелехове. На рисунке 1 показаны схемы расположения постов мониторинга в этих городах.

Схемы размещения постов специально представлены на зимних спутниковых снимках этих городов. Космические снимки наглядно показывают на фоне снежного покрова картину загрязнения городских территорий пыле-аэрозольными выбросами промышленных предприятий, крупных тепловых станций, автомагистралей, автономных источников теплоснабжения. Высокая контрастность загрязнения снега между городами и окружающими их территориями свидетельствует о значительной техногенной нагрузке.

Необходимо отметить, что в зимний период времени на постах Росгидромета фиксируются наиболее высокие концентрации загрязняющих примесей в атмосфере городов, включая взвешенные вещества, сажу, бенз(а)пирен. Это обусловлено, как значительными объёмами выбросов от источников, так и метеорологическими условиями. Зимой Байкальская природная территория находится под влиянием Сибирского антициклона. Для неё в зимние месяцы характерны слабые ветра, инверсии температуры, штилевые условия.

Атмосфера Иркутской области подвержена значительной техногенной нагрузке [7]. Численное исследование процессов атмосферного загрязнения проводилось с использованием данных измерений концентраций БП на постах Росгидромета в городах Ангарске, Усолье-Сибирском, Иркутске, Шелехове.



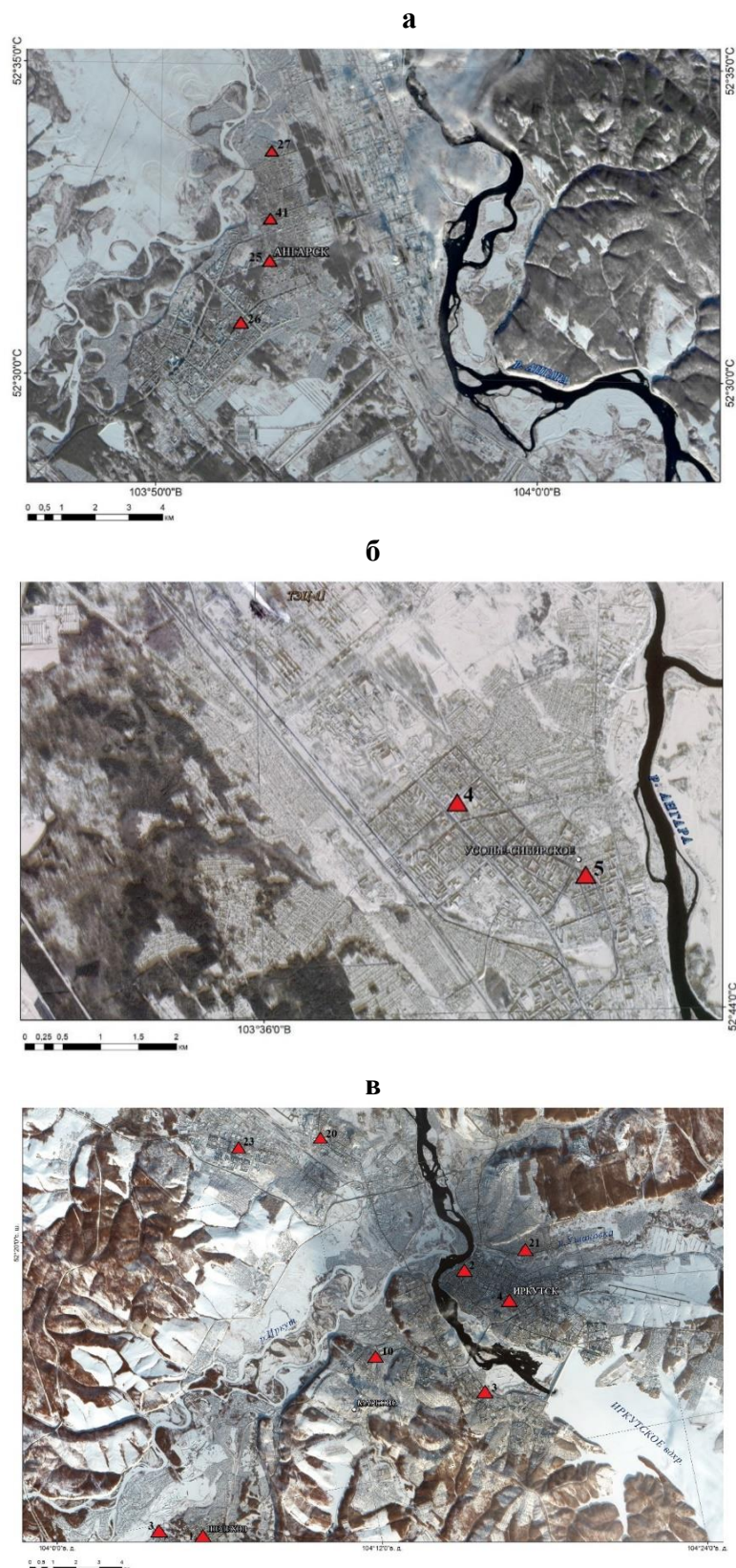


Рисунок 1. Схемы размещения стационарных постов контроля загрязнения воздуха в гг. Ангарске (а), Усолье-Сибирское (б), Иркутске и Шелехове (в).

Следует отметить, что бенз(а)пирен - вещество 1 класса опасности, обладает канцерогенным действием, является продуктом неполного сгорания углеводородов. ПДК по

БП составляет 1 нг/м<sup>3</sup>. Актуальность исследования загрязнения бенз(а)пиреном атмосферы городов Прибайкалья и его влияния на здоровье населения обусловлено наличием чрезвычайно высоких концентраций БП в зимнее время. В таблице 1 для ряда постов мониторинга приведены значения концентраций БП в 2018 г.

**Таблица 1. Содержание бенз(а)пирена (нг/м<sup>3</sup>) в атмосферном воздухе городов БПТ в зимние месяцы 2018 г.**

Город	№ ПНЗ	Январь	Февраль	Ноябрь	Декабрь
Ангарск	27	55.6	35.5	18.4	14.9
Иркутск	3	24.1	9.8	13.3	19.7
Шелехов	1	19.1	19.1	13.6	43.2
Усолье-Сибирское	5	49.4	18.1	20.4	18.5
Черемхово	6	13.8	7.5	22.7	33.5
Свирск	1	39.2	9.6	35.5	43.8

Данные, представленные в таблице 1, показывают, что в холодный период 2018 г. среднемесячные концентрации БП на постах (ПНЗ) варьировались в диапазоне значений от 10 до 55 ПДК. Среднегодовые концентрации на ПНЗ также оказываются высокими. Такая ситуация требует проведения исследований по выявлению причин возникновения экстремальных концентраций БП и принятия решений по приведению уровней загрязнения к нормативным показателям.

На рисунке 2 приведены попарные корреляционные зависимости между значениями среднемесячных концентраций БП на постах гг. Ангарска, Усо́лья-Сибирского, Иркутска, Шелехова.

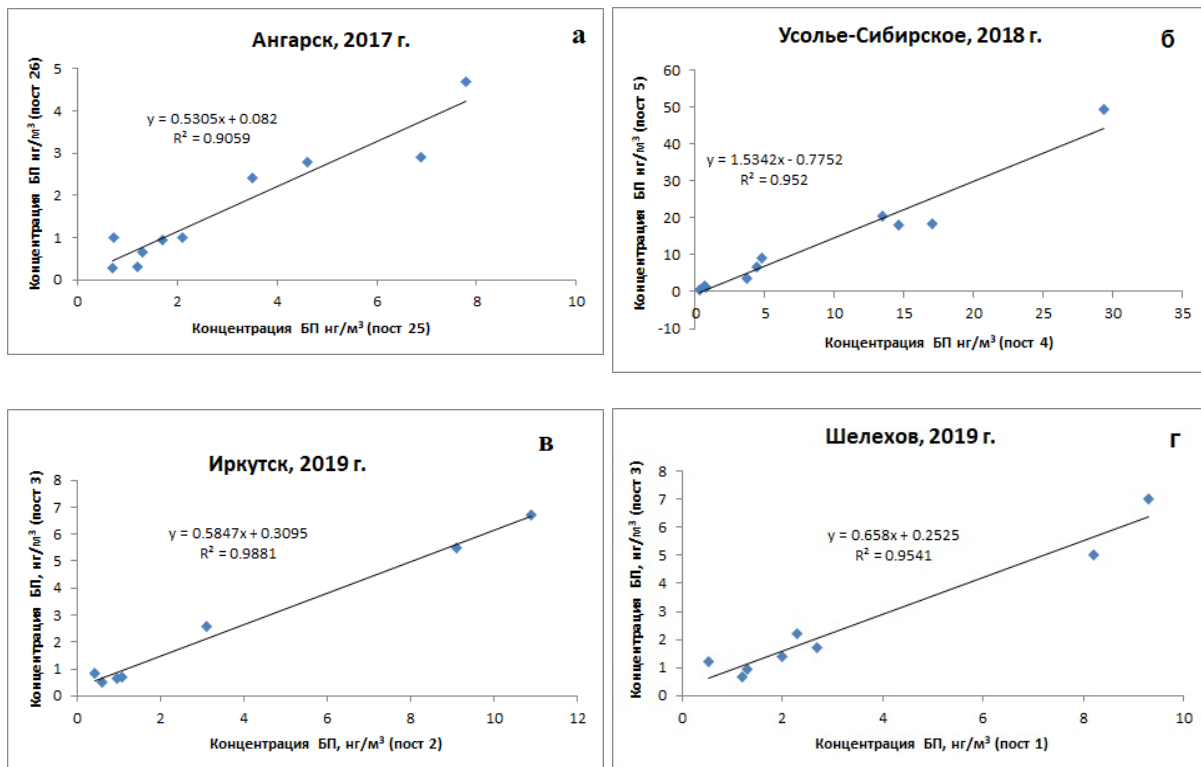


Рисунок 2. Корреляционные связи между измеренными концентрациями БП (нг/м<sup>3</sup>) на постах гг. Ангарска (а), Усо́лья-Сибирского (б), Иркутска (в), Шелехова (г).

Одним из методов численного исследования результатов измерений на сети Росгидромета является анализ статистических связей между измерениями на ПНЗ [8, 9]. При этом предполагается стационарность источников эмиссии в течении года. Рисунки 2а – 2г показывают наличие тесных связей между измерениями БП на рассматриваемых постах. Это позволяет проводить взаимный контроль результатов измерений на ПНЗ, выявлять новые источники БП, а также численно восстанавливать пропуски в наблюдениях.

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2020-787/8 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

1. Безуглая Э.Ю. Мониторинг состояния загрязнения атмосферы в городах. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 199 с.

2. Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В. Воздух городов и его изменения. СПб.: Астерион, 2008. 254 с.

3. Аналитический обзор: Качество воздуха в крупнейших городах России за десять лет. СПб.: Астерион, 2009. 133 с.

4. Селегей Т.С. Формирование уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах Сибири. Новосибирск: Наука, 2005. 348 с.

5. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 182 с.

6. Прокачева В.Г., Усачев В.Ф. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения в сфере влияния городов и дорог // Метеорология и гидрология. 2013. № 3. С. 94-106.

7. Лешук С.И. Техногенное загрязнение атмосферы создает риск нарушения экологического равновесия (на примере Иркутской области) // Новая наука: Современное состояние и пути развития. 2015. № 2. С. 5-8.

8. Рапуга В.Ф., Леженин А.А. Анализ процессов длительного загрязнения атмосферы г. Искитима // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т.4. № 1. С. 137-141.

9. Леженин А.А., Рапуга В.Ф. Методы оценивания загрязнения атмосферы города по данным мониторинга // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. Т.4. № 1. С. 159-166.

## ПРОБЛЕМЫ ЛЕСОПОЛЬЗОВАНИЯ В СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ КАРЕЛИИ

*Леонтьева Е.А.<sup>1</sup>, Алексеева М.Н.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет, [katyisha0703@gmail.com](mailto:katyisha0703@gmail.com)

<sup>2</sup>Институт химии нефти СО РАН, г. Томск, [amn@ipc.tsc.ru](mailto:amn@ipc.tsc.ru)

По экологическим, природоохранным и рекреационным критериям Зеленый пояс Фенноскандии, простирающийся по обе стороны вдоль российско-финляндско-норвежской границы на протяжении около полутора тысяч километров, представляет собой уникальный природный объект, имеющий общеевропейское значение [1]. С 1999 года основной экологической проблемой лесного комплекса Карелии является истощительное неустойчивое лесопользование, основанное на учете только текущих экономических интересов лесопромышленных холдингов [2]. Рубка леса в Карелии значительно влияет на состояние местных уникальных экосистем. Леса играют важную роль в поддержании равновесия климата: влияют на водообмен, отражение солнечного света, циркуляцию воздуха, являются естественными поглотителями углекислого газа. Исчезновение лесного массива может привести к серьезным изменениям климата и негативно повлиять на экологический баланс. В январе 2023 года учеными Карельского научного центра РАН и специалистами КРОО "СПОК" при поддержке Всемирного фонда дикой природы были подготовлены и переданы в Министерство природных ресурсов РК материалы комплексного экологического обследования планируемого заказника "Максимъярви", обосновывающие придание ему статуса особо охраняемой природной территории (ООПТ). В настоящее время экологами ведутся наблюдения за рубками леса с использованием космических снимков [3].

Цель данной работы – оценить динамику вырубок лесов в границах планируемого заказника "Максимъярви" на северо-западе Муезерского лесничества в Республике Карелия с помощью космических снимков. Исходя из цели были поставлены следующие задачи:

- Построить геоинформационную систему в ArcMap со слоями: типов леса, границ особо охраняемых территорий в Муезерском лесничестве, квартальной сети лесов из сети Интернет [4];
- Рассчитать вегетационный индекс NDVI и коротковолновый вегетационный индекс SWVI;
- Сравнить площади вырубленных лесов за периоды с 2014 по 2019 и с 2019 по 2023 гг.
- Оценить состояние леса по вычисленным индексам.

Объектом исследования является северо-западная часть Муезерского лесничества в границах планируемого заказника "Максимъярви" площадью 71337 га.

Общая площадь Муезерского лесничества по состоянию на 01.01.2020 г. составляет 1747,4 тыс. га. В состав лесничества входят 12 участковых лесничеств, которые включают 19 лесничеств (по лесоустройству), имеющих отдельную нумерацию лесных кварталов. На данной территории преобладают смешанные лиственно-хвойные леса, сосняки зеленомошные и болота с преобладанием сфагнома. Общая площадь лесов составляет 1747361 га, из них защитных – 381413 га, эксплуатационных – 1365948 га.

На территории Муезерского лесничества находится 3 ООПТ регионального значения: государственный природный заказник "Юдальский", памятник природы "Болото Тикша", памятник природы "Воттоваара". Там же планируется создание еще 10 ООПТ регионального значения [5].

В границах планируемого заказника "Максимьярви" находится малонарушенная лесная территория – один из последних крупных участков тайги в Карелии, практически не тронутый деятельностью человека. Эталонные северотаежные леса сохранялись здесь на протяжении веков. В таких лесах одновременно существует несколько поколений деревьев. Среднее поколение представлено деревьями 150-200 лет, а самые старые ели и сосны приближаются к верхнему возможному пределу для своей породы – 300 лет и более. Всего на территории будущего заказника обнаружено 73 краснокнижных вида растений, грибов и животных. Расположены там и ключевые местообитания лесного северного оленя, включенного в Красную книгу России [3].

В нашей работе применялись космические снимки, приведенные в табл. 1.

**Таблица 1. Космические снимки и климатические показатели в даты спутниковых съемок на метеостанции Реболы.**

Спутник	Дата	Температура, °C	Относительная влажность воздуха, %
Landsat-8	11.07.2014	19.8	50
Landsat-8	25.07.2019	22.1	50
Landsat-8	11.07.2023	18	46

Для характеристики состояния вырубленных участков по КС Landsat-8 рассчитали вегетационные индексы NDVI и SWVI. Расчет индекса NDVI основан на разнице отражения в ближней инфракрасной области электромагнитного спектра (nir) и в красной части спектра (red). Для Landsat-8 на красную зону спектра с длинами волн 0,63-0,68 мкм приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону с длинами волн 0,845-0,885 мкм – максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. NDVI является показателем количества фотосинтетически активной биомассы и вычисляется по формуле [6]:

$$NDVI = (P_{nir} - P_{red}) / (P_{nir} + P_{red}),$$

где  $P_{nir}$ ,  $P_{red}$  – отражение в ближней инфракрасной и красной областях спектра. Одним из наиболее информативных показателей для спутникового мониторинга преобразованного растительного покрова является коротковолновый вегетационный индекс SWVI, который отражает влагосодержание растительности в поверхностном слое, в том числе в листьях и рассчитывается по формуле [6]:

$$SWVI = (P_{nir} - P_{sswir}) / (P_{nir} + P_{sswir}),$$

где  $P_{sswir}$  – отражение в средней инфракрасной области спектра.

Для изучения природного лесовосстановления и оконтуривания границ вырубок в ArcMap рассчитывались карты разностных вегетационных индексов:

$$D_{ndvi} = NDVI_{post} - NDVI_{pre};$$

$$D_{swvi} = SWVI_{post} - SWVI_{pre},$$

где  $NDVI_{pre}$  и  $SWVI_{pre}$  – значения вегетационных индексов в предыдущий период,  $NDVI_{post}$  и  $SWVI_{post}$  – значения в последующий период. Рассматриваемыми периодами явились: с 2014 по 2019 гг.; с 2019 по 2023 гг.

Всего, с 2014 по 2019 гг. был вырублен лес на площади 1630 га (2,8% от общей площади планируемого заказника), с 2019 по 2023 гг. – 901,6 га (1,26% соответственно).

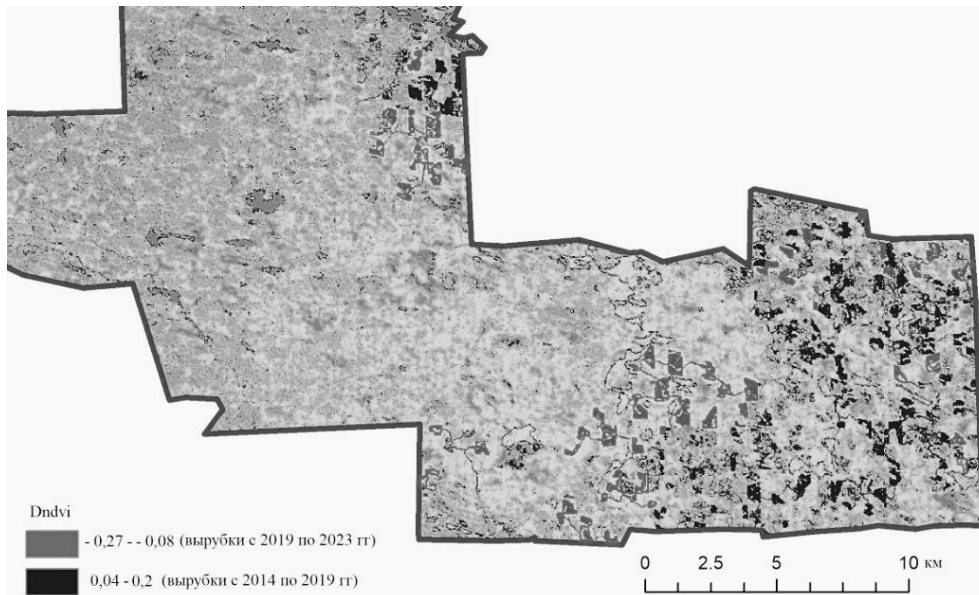


Рисунок 1. Карта разностного вегетационного индекса Dndvi (разность между 2023 и 2019 гг.) в границах планируемого заказника "Максимъярви".

На рис. 1 видно снижение NDVI (на 0,08 – 0,3) на месте вырубленных 2019 по 2023 года лесов по отношению к NDVI 2019 года. На месте вырубленных с 2014 по 2019 гг. лесов наблюдается увеличение значений NDVI в 2023 году (на 0,04 - 0,2) по отношению к NDVI 2019 года.

Средствами ArcMap были найдены центральные точки контуров вырубок разных лет и в них определены средние значения NDVI по состоянию на 11.07.2023 г. Среднее значение NDVI, на старых (проведенных с 2014 по 2019 гг.) вырубках равно 0,6, на свежих вырубках (с 2019 по 2023 гг.) – 0,4, фоновых территорий – 0,65. Средние значения SWVI на старых вырубках – 0,14, на новых – минус 0,01, на фоновых территориях – 0,4 (рис. 2).

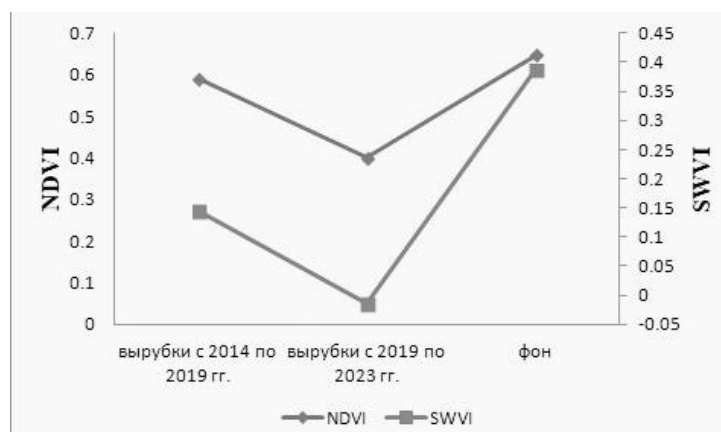


Рисунок 2. Изменение значений NDVI и SWVI на вырубках и фоновых территориях в границах планируемого заказника "Максимъярви".

Данное распределение индекса NDVI показывает зарастание старых 5 летней давности вырубок. Низкие значения индекса SWVI старых вырубок свидетельствуют о не сформированном пологе древесной растительности.



В целом, за 2014-2023 гг. было вырублено 2531 га (3,5 % от общей площади лесов в границах ООПТ "Максимьярви"). Мониторинговые исследования экологов [3] показали, что с ноября 2022 по январь 2023 гг. Лендерский ЛПХ и Ледмозерское ЛЗХ вырубали около 350 га лесов в границах планируемого заказника.

Выводы: необходимо на различных уровнях поднимать вопросы о сохранности уникальных природных ландшафтов и лесов высокой природоохранной ценности в приарктической зоне; показана значимость и актуальность дистанционного мониторинга приарктических территорий совместно с наземными исследованиями природного лесовосстановления.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН, финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (НИОКТР 121031500048-1).

1. Изучение динамики лесных массивов карельской части зеленого пояса феноскандии методами дистанционного зондирования // Труды Карельского научного центра РАН – 2019.– № 4. – С. 89–99. –DOI: 10.17076/them1023.

2. Проблемы лесопользования и охраны ценных естественных лесов Карелии // Труды Карельского научного центра РАН – 2019. – №4. – С. 89-99. – URL: <http://old.forest.ru/rus/publications/karelia/>.

3. Массовые рубки в планируемом заказнике "Максимьярви" стали поводом для обращения экологов в природоохранную прокуратуру // Karelianews. – Петрозаводск, 2023. – URL: <https://karelia.news/news/10083788/massovye-rubki-v-planiruem-zakaznike-maksim-iarvi-stali-povodom-dlya-obrashheniya-yekologov-v-prirodookhrannuyu-prokuraturu/> (дата обращения: 20.07.2023).

4. Леса высокой природоохранной ценности. – [Б. м.]. – URL: <https://hcvf.ru/ru> (дата обращения 20.07.2023).

5. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Республики Карелия от 30.09.2020 № 1715"Об утверждении лесохозяйственного регламента Муезерского лесничества Республики Карелия" // Официальное опубликование правовых актов. – [Петрозаводск], 2020. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/1001202010080004?index=1> (дата обращения: 21.07.2023).

6. Наземно-дистанционные исследования постпирогенных ландшафтов Томской области /М.Н.Алексеева, И.В. Русских, И.Г.Яценко, П.Б. Кадычагов // Оптика атмосферы и океана. – 2022. – №7. – С.539-548.

## ПЕРЕМЕНА МЕТЕОУСЛОВИЙ КАК ОДИН ИЗ ФАКТОРОВ РИСКА ОСТРОГО ИНФАРКТА МИОКАРДА У БОЛЬНЫХ

*Лихачева О.Ю.<sup>1</sup>, Нечепуренко О.Е.<sup>1</sup>, Ретин А.Н.<sup>2</sup>, Округин С.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет, oksanalihacheva17138@gmail.com,  
o.e.nechepurenko@gmail.com

<sup>2</sup>Томский национальный исследовательский медицинский центр РАН,  
ran@cardio-tomsk.ru, sao@cardio-tomsk.ru

Обсуждение влияния погодных условий на здоровье человека ведется уже давно, но пока не было достигнуто конкретных обоснованных результатов. Здоровый организм способен быстро приспособиться к изменениям погодных условий, в то время как для людей с сердечно-сосудистыми заболеваниями процесс адаптации может быть более трудным [1–2]. Резкие изменения метеорологических условий могут оказать серьезное неблагоприятное воздействие на организм человека, усугубляя патологические процессы, ухудшая самочувствие и вызывая различные расстройства.

Негативное влияние факторов метеоусловий на самочувствие человека в последние годы всё чаще наблюдается. Особенно ярко выражена такая реакция у людей, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями. Развитие сосудистых болезней связано с развитием реакций общего стресса, причинами которого могут быть как физиологические, социальные, так и природные факторы.

Поэтому весьма актуально оценить влияние физических процессов, происходящих в атмосфере, и их изменения на число сердечных приступов человека. Интерес представляет влияние погоды на возникновение острого инфаркта миокарда и острой коронарной недостаточности. Наибольшее воздействие на самочувствие человека оказывает метеотропность в разные сезоны года, особенно при резком изменении погодных условий во время смены сезона.

Исследования повторяемости сосудистых катастроф показывают, что в годовом ходе обострений приступов наблюдается сезонная динамика. Наибольшая вероятность их возникновения приходится на холодное время года, а наименьшая – на теплое, и крайне важно выяснить причины или влияющие факторы такой закономерности [3–4]. Также, известно, что больше всего инфарктами страдают мужчины, а средний возраст приходится на пожилых людей от 60 лет [5].

Целью данного исследования является изучение влияния метеоусловий в различные сезоны года на кратность развития сосудистых катастроф в г. Томске за 2019–2021 гг.

В качестве материалов исследования использовалась информация о количестве случаев острого инфаркта миокарда (ОИМ) и острой коронарной недостаточности (ОКН) у людей старше 65 лет за 2019–2021 гг., полученная из программы «Регистр острого инфаркта миокарда» (РОИМ) ФГБНУ «Научно-исследовательский институт кардиологии» г. Томска. Источником метеорологических срочных данных (температура воздуха, атмосферное давление, барическая тенденция, скорость ветра, относительная влажность, атмосферные явления) на станции Томск за период 2019–2021 гг. послужил массив на сайте Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД): <http://meteo.ru/data>.

Все практические расчеты и статистическая обработка полученных данных проводились с использованием пакета данных Microsoft Excel 2016 и специализированного математического пакета статистического анализа данных Statistica 10.



Для установления влияния исследуемых метеорологических факторов на уровень артериального давления использовали непараметрический критерий Краскела – Уоллиса. Непараметрические критерии применяют тогда, когда распределение в группах не подчиняется закону нормального распределения, что довольно часто встречается в медицинских исследованиях. Данный критерий Краскела – Уоллиса используется в тех ситуациях, когда статистическому анализу подвергается сравнение двух или более независимых выборок.

С помощью непараметрического критерия Краскела-Уоллиса производилась оценка двух ситуаций: влияние барической тенденции и температуры воздуха на число приступов ОИМ и ОКН. Для использования данного критерия необходимо выделить группы исследуемых переменных в зависимости от рассматриваемой ситуации.

При рассмотрении первого фактора выборка была разделена на три группы: А (от 0 до 5 гПа/ 24 ч), В (от 5 до 10 гПа/ 24 ч) и С (более 10 гПа/ 24 ч). В первую группу вошло 589 дней, во вторую – 266 дней, а в третью – всего 142 дня. Существенные различия, особенно между первой и третьей группой, произошли по причине того, что в группу А входит наиболее часто встречающийся диапазон значений давлений, который к тому же является характерным для погодного режима исследуемой территорией. В тот же момент группа С, наоборот, отвечает за значения барической тенденции, которые имеют низкую повторяемость и приближены к экстремальным значениям для данной территории. Из-за такой колоссальной разницы провести равнозначный анализ становится труднее [6].

Поэтому было принято решение сократить исходную выборку, но при этом по максимуму сохранить вклад числа приступов в каждую группу. Главный принцип уменьшения выборки состоял в том, что процентное соотношение каждой повторяемости числа приступов за один день на общее количество приступов за весь рассматриваемый период должен остаться таким же в уже преобразованной выборке.

Следующая ситуация включала в себя оценку влияния величины температуры воздуха на количество приступов острого инфаркта миокарда и острой коронарной недостаточности. В зависимости от температурного режима были выделены следующие группы: А (от -40 до -15 °С) В (от -15 до 10 °С) и С (от 10 до 25 °С). При анализе полученных групп также возникли трудности: группа В (522 дня) по объему сильно превышала остальные, особенно группу А (всего 126 дня). Кроме того, третья группа (С) тоже превосходила по количеству группу А; сокращение длины выборки происходило по тем же принципам, что и для ранее рассмотренной ситуации.

Итоговая выборка составила 693 дня, где выделенные группы имеют различие по количеству значений, но не отягощают сильный перевес.

Были определены нулевая ( $H_0$ ) и альтернативная гипотезы ( $H_1$ ). Нулевая гипотеза предполагает, что каждая группа имеет одинаковое распределение, при  $H_0$  средние значения в каждой выборке должны быть одинаковыми. Альтернативная гипотеза представляет собой полную противоположность нулевой, то есть предполагает, что каждая группа имеет разное распределение [7]. Оценка результатов происходит на основе уровня значимости. При уровне значимости ( $p$ ) меньше 0,05 нулевая гипотеза отклоняется. Изначально финальную выборку нужно ранжировать по возрастанию и каждому значению присвоить ранг, так как критерий непараметрический, и все расчеты основаны на рангах, а не фактических значениях.

В таблице 1 представлены результаты выявления связи между значением барической тенденции и количеством приступов, с помощью непараметрического критерия Краскела–Уоллиса.

**Таблица 1. Оценка влияния барической тенденции.**

<i>Кр.Краскела-Уоллиса: <math>H(2, N=693) = 10,21052</math> <math>p = 0,0061</math></i>				
<b>Группа</b>	<b>Код</b>	<b>Допуст - N</b>	<b>Сумма - Рангов</b>	<b>Среднее - Ранг</b>
<b>А</b> от 0 до 5 гПа/ 24 ч	101	285	92184,5	323,5
<b>В</b> от 5 до 10 гПа/ 24 ч	102	266	93381,5	351,1
<b>С</b> более 10 гПа/ 24 ч	103	142	54905	386,7

Проанализировав полученные результаты в таблице можно отметить следующие пункты: полученный уровень значимости ( $p=0,0061$ ) ниже заданного порогового значения, т.е. нулевая гипотеза об отсутствии различий отклоняется и принимается альтернативная. Соответственно результаты в таблице являются статистически значимы, и распределение в группах различное. По среднему числу рангов можно определить, что самое большое влияние оказывает группа С, далее группа В и наименьший вклад у группы А. Из полученных результатов получается следующий вывод: в данной выборке присутствует статистическое различие, т.е. влияние значений барической тенденции на число приступов, и наибольшее влияние характерно группе С, отвечающая за изменение атмосферного давления на 10 гПа и более за 24 часа.

В таблице 2 представлены результаты оценки влияния значений температуры воздуха на количество приступов острого инфаркта миокарда и острой коронарной недостаточности.

**Таблица 2. Оценка влияния температуры воздуха.**

<i>Кр.Краскела-Уоллиса: <math>H(2, N=693) = 18,38287</math> <math>p = 0,0001</math></i>				
<b>Группа</b>	<b>Код</b>	<b>Допуст - N</b>	<b>Сумма - Рангов</b>	<b>Среднее - Ранг</b>
<b>В</b> от -15 до 10 °С	101	290	110339,0	380,5
<b>А</b> от -40 до -15 °С	102	126	44066,0	349,7
<b>С</b> от 10 до 25 °С	103	277	86066,0	310,7

На основе результатов Краскела – Уоллиса получено, что рассчитанный критерий обладает высокой значимостью, т.е. уровень  $p=0,0001$  значительно ниже установленного порогового значения (0,05), нулевая гипотеза (каждая группа имеет одинаковое распределение) отклоняется, а альтернативная, наоборот, принимается (группы имеют разное распределения). Следовательно, распределение различных характеристик групп имеют значимое статистическое различие. Оценивая степень влияния между всеми группами можно увидеть, что среднее ранга группы В превосходит по своему численному значению остальные группы. Так как эта группа состоит из температурного режима осеннего и весеннего сезонов, то такой результат может складываться из общего погодного влияния данных сезонов (в эти сезоны наблюдаются самая резкая смена метеопараметров).

Если же оценивать влияние только максимально низких и высоких температур (группы А и С), то можно выделить следующие: средний ранг группы А, отвечающей за низкие отрицательные температуры выше, чем группы С (высокие положительные температуры).

Выводы:

1. Изменение атмосферного давления оказывает влияние на количество приступов острого инфаркта миокарда и острой коронарной недостаточности. Особое влияние оказывает резкое колебание атмосферного давления за сутки на 10 гПа и более.

2. Значение температуры воздуха оказывает влияние на развитие приступов острого инфаркта миокарда и острой коронарной недостаточности. Наибольшее влияние оказывает изменение температуры в переходные сезоны года и зимой.

1. Салтыкова М.М., Бобровницкий И.П., Яковлев М.Ю., Банченко А.Д. Влияние погоды на пациентов с болезнями системы кровообращения: главные направления исследований и основные проблемы // Экология человека. - 2018. - Т. 25. - №6. - С. 43–51.

2. Кузьменко Н.В., Плисс М.Г., Цырлин В.А. Зависимость цирканнуальной динамики артериального давления от сезонных колебаний метеорологических и гелиофизических факторов // Российский кардиологический журнал. 2019. №24. С. 80–93.

3. Sarna S, Romo M, Siltanen P. Myocardial infarction and weather. //Annals of Clinical Research. [Электронный ресурс]. — URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/kriterij-kraskela-uollisa/> (дата обращения: 20.04.2023).

4. Jang H.L., Shung C.C., Dong H.Y., Influence of weather on daily hospital admissions for acute myocardial infarction (from the Korea Acute Myocardial Infarction Registry) //International Journal of Cardiology. [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167527309004112> (дата обращения: 20.04.2023).

5. Новикова И.А., Некрутенко Л.А., Лебедева Т.М., Хлынова О.В., Шишкина Е.А. Пациент после инфаркта миокарда: факторы риска новых сердечно-сосудистых катастроф// Анализ риска здоровью. 2019. №1. С. 135–143.

6. Критерий Краскела-Уоллиса // Skillfactory media [Электронный ресурс]. — URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/kriterij-kraskela-uollisa/> (дата обращения: 25.04.2023).

7. Критерий Краскела-Уоллиса // Портал знаний [Электронный ресурс]. — URL: <https://statistica.ru/local-portals/medicine/kriterij-kraskela-uollisa/>(дата обращения: 25.04.2023).

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ПРОЗРАЧНОСТЬ АТМОСФЕРЫ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Нагорский П.М.<sup>1</sup>, Козлов В.И.<sup>2</sup>, Торопов А.А.<sup>2</sup>, Пустовалов К.Н.<sup>1,3</sup>, Смирнов С.В.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
npm\_sta@mail.ru

<sup>2</sup>Институт космофизических исследований и аэронауки ФИЦ ЯНЦ СО РАН

<sup>3</sup>Томский государственный университет

В населенных пунктах на территории Сибири при экстремально низких температурах воздуха  $T_a$  образуются ледяные туманы, которые при дальности видимости  $S_d$  менее 0,1–0,2 км являются опасным метеорологическим явлением. Процессы электризации аэрозольных частиц в облаках, летних и зимних туманах, вулканических извержениях, пыльных бурях прямо указывают на существенные различия вариаций напряженности электрического поля в этих условиях по сравнению с условиями «хорошей» погоды [1–3]. Исследования взаимосвязей метеорологической дальности видимости  $S_d$  и напряженности электрического поля  $E$  проводились ранее в условиях летних дымок, дымах лесных пожаров, зимнем городском смоге [3].

Вместе с тем, состояние городского приземного слоя атмосферы во время сильных морозов является одним из наименее изученных атмосферно-электрических явлений. Это определяет актуальность исследования атмосферного электричества в городской среде как фактора, воздействующего на окружающую среду и человека.

Для анализа воздействия низких температур на состояние приземного слоя и  $S_d$  использованы следующие данные:

- градиент потенциала электрического поля  $\nabla\phi$  (г. Томск, г. Якутск);
- полярные электропроводности воздуха  $\lambda_{\pm}$  (г. Томск);
- основные метеовеличины и параметры турбулентности (г. Томск, г. Якутск).

Дополнительно привлекались данные: а) метеостанций Томска и Якутска (<https://tr5.ru/>); б) аэрологического зондирования (<http://weather.uwyo.edu/upperair/>); в) спектрорадиометра MODIS на спутниках «Aqua» и «Terra».

Из всех перечисленных баз данных за период 2008–2017 гг. (г. Томск) и 2010–2016 гг. (г. Якутск) были отобраны интервалы с достаточно длинными (неделя и более) периодами понижения  $T_a$ : в Томске от  $0^{\circ}$ – $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-30^{\circ}\text{C}$  и ниже; в Якутске от  $-5^{\circ}$ – $-15^{\circ}\text{C}$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  и ниже. В итоге, в Томске были отобраны интервалы: 29.11.2008 г. – 25.02.2009 г., 30.11.2009 г. – 02.03.2010 г., 07.12.2010 г. – 28.01.2011 г., 09.01.2012 г. – 06.02.2012 г., 09.12.2012 г. – 02.02.2013 г., 20.12.2013 г. – 08.02.2014 г., 22.11.2014 г. – 08.01.2015 г., 07.01.2016 г. – 24.01.2016 г., 19.12.2016 г. – 22.01.2017 г.; в Якутске: 10.12.2010 г. – 31.01.2011 г., 05.01.2012 г. – 20.01.2012 г., 05.12.2012 г. – 25.01.2013 г., 01.12.2014 г. – 20.01.2015 г., 15.12.2015 г. – 08.01.2016 г.

Из отобранных данных исключались участки, для которых скорость ветра превышала 2 м/с и (или) регистрировались осадки с интенсивностью более 0,1 мм/12 ч. При обработке данные усреднялись на 2-часовом интервале. Сдвиг по времени составил 1 ч.

На основе проведенного исследования были получены следующие зависимости. Для Якутска (рис. 1):  $S_d$ , градиента потенциала напряженности поля ( $\nabla\phi = -E$ ) и относительной влажности  $h$  от  $T_a$ ; дальности видимости от  $\nabla\phi$ . Для Томска (рис. 2):  $\nabla\phi$ ,  $\lambda_{\pm}$  и  $S_d$  от  $T_a$ .

Для г. Якутска отличительной чертой вариаций  $\nabla\phi$  при экстремально низких  $T_a$  является то, что средняя величина  $\nabla\phi$  убывает и стремится к значению  $\sim 60$  В/м, разброс

значений  $\nabla\phi$  также убывает. Основной причиной такого поведения  $\nabla\phi$  может быть спонтанная кристаллизация влаги и, как следствие, обезвоживание атмосферы при  $T_a < -39^\circ\text{C}$  (снижение абсолютной влажности воздуха практически до нуля). При  $T_a < -35^\circ\text{C}$  обращают на себя внимание два явления: резкое падение относительной влажности (рис. 1б, стрелка 1) и плавное уменьшение  $S_d(T_a)$  с 20–50 до 0,1–0,3 км (рис. 1г). При этом линии регрессии (рис. 1) имеют следующий вид:

$$\nabla\phi(T_a) = 0,88 \cdot T_a + 109, \quad h(T_a) = 0,24 \cdot T_a + 82,$$

$$S_d(\nabla\phi) = 0,0074 \cdot \nabla\phi - 0,7, \quad \lg(S_d(T_a)) = \lg(S_{d0}) + \lg(\delta S_d) \cdot \text{th}((T_a - T_{a0})/\delta T_a).$$

Здесь:  $\lg(S_{d0}) = 0,5$ ;  $T_{a0} = -38^\circ\text{C}$  – координаты точки перегиба (стрелка 2, рис. 1г);  $\lg(\delta S_d) = 1,1$ ;  $\delta T_a = 2,8^\circ$  – половина размаха вариаций и полуширина переходной зоны.

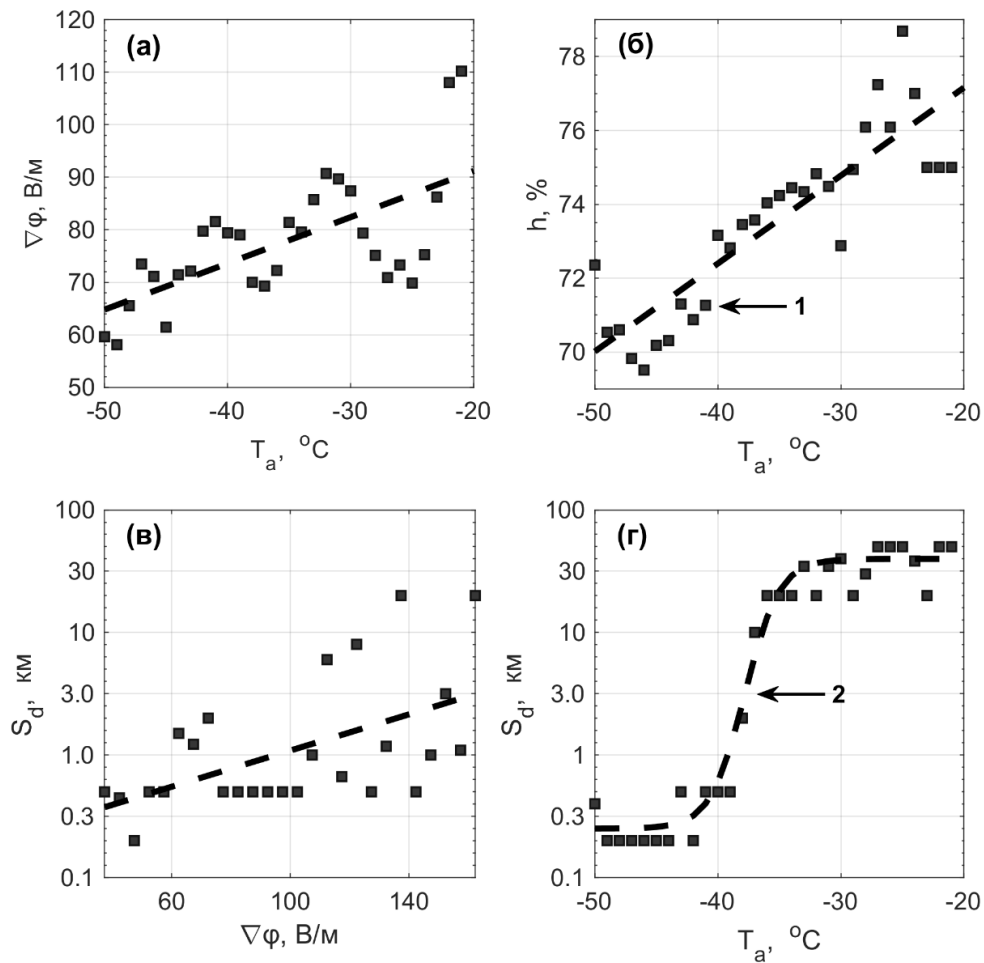


Рисунок 1. Зависимости: а) градиента потенциала от температуры ( $\nabla\phi(T_a)$ ); б) относительной влажности от температуры ( $h(T_a)$ ); в) дальности видимости от градиента потенциала ( $S_d(\nabla\phi)$ ); г) дальности видимости от температуры ( $S_d(T_a)$ ). Здесь: квадратики – исходные данные; штриховые линии – линии регрессии.

Анализ данных, полученных в г. Томск, показал: а) при понижении  $T_a$  до  $\sim -30^\circ\text{C}$   $\nabla\phi$  увеличивается; б) при дальнейшем понижении  $T_a$  он начинает уменьшаться. Противоположным образом ведут себя полярные электропроводности: до  $T_a \sim -30^\circ\text{C}$  они

уменьшаются, а при дальнейшем падении  $T_a$  – начинают расти (рис. 2). Для  $\nabla\varphi$  и  $\lambda_{\pm}$  линии регрессии (рис. 2) построены отдельно для фаз нарастания и падения  $T_a$  и представлены соотношениями:

$$\begin{aligned} \lambda_{-}(T_a \leq -32^{\circ} \text{C}) &= 0,2 \cdot T_a + 4,7, & \lambda_{-}(T_a \geq -32^{\circ} \text{C}) &= -0,18 \cdot T_a - 8, \\ \lambda_{+}(T_a \leq -32^{\circ} \text{C}) &= -0,2 \cdot T_a - 2,2, & \lambda_{+}(T_a \geq -32^{\circ} \text{C}) &= -0,057 \cdot T_a + 4,7, \\ \nabla\varphi(T_a \leq -32^{\circ} \text{C}) &= 17,4 \cdot T_a + 778, & \nabla\varphi(T_a \geq -32^{\circ} \text{C}) &= -3,37 \cdot T_a + 49. \end{aligned}$$

Регрессионная зависимость  $S_d$  от  $T_a$  построена по формуле, аналогичной для Якутска, но с другими коэффициентами:  $\lg(S_{d0}) = 0,4$ ;  $\lg(\delta S_d) = 0,9$ ;  $T_{a0} = -36^{\circ} \text{C}$ ;  $\delta T_a = 2,8^{\circ}$ .

Как метеостанция г. Якутск, так и флюксметр, расположенный на здании ИКФИА СО РАН, находятся в пойме р. Лена, в то время как измерительная аппаратура геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС) расположена в наиболее возвышенной части г. Томска. В связи с этим, случаев уменьшения дальности видимости при понижении  $T_a$  в ГО ИМКЭС зарегистрировано существенно меньше чем в г. Якутске, а регрессионная кривая  $S_d(T_a)$  построена по очень ограниченному количеству данных.

Полученные результаты позволяют существенно скорректировать выводы, представленные в работе [3]. В этой работе было установлено, что падение температуры сопровождается уменьшением  $S_d$  и увеличением  $\nabla\varphi$ . Одним из важнейших механизмов, приводящих к увеличению  $\nabla\varphi$ , является уменьшение числа легких ионов. Повышение концентрации атмосферного аэрозоля во время сильных морозов приводит к появлению канала усиленного стока легких ионов на аэрозоль. Уменьшение концентрации легких ионов приводит к соответствующему уменьшению электропроводности воздуха и, следовательно, к росту напряженности электрического поля. Таким образом, согласно [3], падение температуры и образование ледяной дымки (тумана) приводит к росту градиента потенциала электрического поля.

Как показали наши результаты, выводы [1, 2] оказываются справедливыми только для температур выше  $-30^{\circ}\text{C}$ . При более низких температурах  $T_a$  и уменьшении  $S_d$  среднее значение  $\nabla\varphi$  уменьшается и при  $T_a \sim -40^{\circ}\text{C}$  приближается к  $\sim 60$  В/м. Абсолютные значения полярных электропроводностей при температурах ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  также начинают расти. Таким образом, при температурах ниже  $-30^{\circ}\text{C}$  сток легких ионов на аэрозоль становится малоэффективным. Основной причиной, по-видимому, является спонтанное обезвоживание приземной атмосферы при понижении температуры. Возможной причиной выявленных закономерностей является то, что при спонтанном обезвоживании приземной атмосферы характерный размер частиц ледяного аэрозоля возрастает на несколько порядков. Поскольку масса аэрозоля при этом практически не меняется, то его концентрация соответственно уменьшается.

И, несмотря на то, что коэффициент присоединения легких ионов к аэрозольным частицам возрастает из-за увеличения их размеров, сток легких ионов на аэрозоль становится неэффективным и, как следствие, полярные электропроводности начинают расти с понижением температуры.

Результаты исследования вариаций  $\nabla\varphi$ ,  $\lambda_{\pm}$  и  $S_d$  в городской среде при понижении  $T_a$  позволили установить:

1) при понижении  $T_a$  до  $\sim -30^{\circ}\text{C}$  значения  $\nabla\varphi$  увеличивается, а при дальнейшем понижении  $T_a$  средняя величина  $\nabla\varphi$  стремится к  $\sim 60$  В/м. Значения  $\lambda_{\pm}$  ведут себя противоположным образом: до  $T_a \sim -30^{\circ}\text{C}$  они уменьшаются, а при дальнейшем падении  $T_a$  – начинают расти;

2) при  $T_a < -35^{\circ}\text{C}$  выявлен плавный переход  $S_d(T_a)$  с 20-50 км до 0,1-0,3 км;

3) при понижении  $T_a$  происходит трансформация фазового состояния воды от жидко-капельного или смешанного к кристаллическому, а также спонтанное обезвоживание атмосферы. Это приводит к росту размера частиц аэрозоля (гидрометеоров), уменьшению его концентрации и неэффективности стока ионов на аэрозоль.

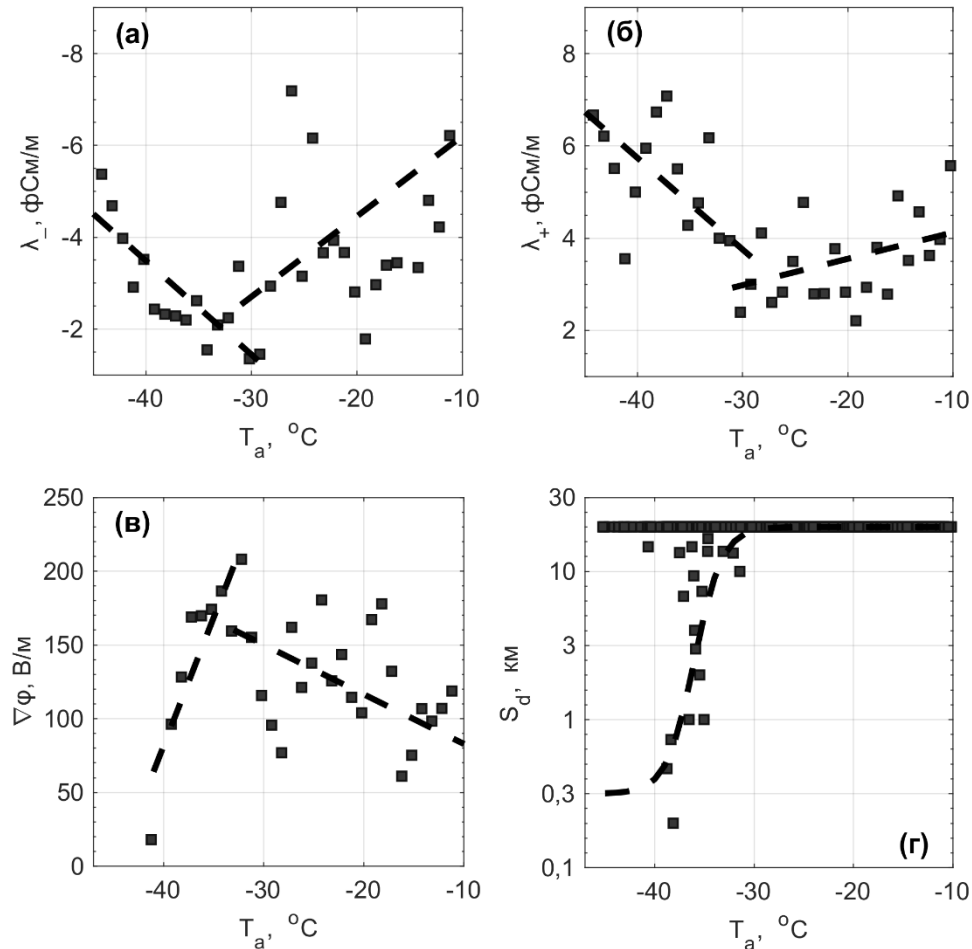


Рисунок 2. Зависимости: а)  $\lambda_-$  от  $T_a$ ; б)  $\lambda_+$  от  $T_a$ ; в)  $\nabla\phi$  от  $T_a$ ; г)  $S_d$  от  $T_a$ .  
Здесь: квадратики – исходные данные; штриховые линии – линии регрессии.

Авторы признательны сотрудникам ГО ИМКЭС за предоставленные метеорологические и атмосферно-электрические данные.

1. Основные сценарии развития вариаций атмосферно-электрических величин в приземной атмосфере во время сильных морозов на территории Сибири / В.И. Козлов, П.М. Нагорский, К.Н. Пустовалов, С.В. Смирнов, А.А. Торопов // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2019. Т. 29. № 4. С. 124–137.

2. Anomalous behavior of the electric field of the atmosphere at the extremely low winter temperatures / V.I. Kozlov, V.N. Morozov, P.M. Nagorskiy, K.N. Pustovalov, A.A. Toropov // Proc. SPIE. 2018. V. 10833. P. 108338O-1–108338O-4.

3. Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля / Ю. А. Пхалагов и др. // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. №1. С. 25–30.

## СВЯЗЬ ПРИЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ИНТЕГРАЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ АЭРОЗОЛЯ В АТМОСФЕРЕ НА ПРИМЕРЕ Г. ТОМСКА

Пустовалов К.Н.<sup>1,2</sup>, Ахмадалиева С.Х.<sup>2</sup>, Назорский П.М.<sup>1</sup>, Смирнов С.В.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет, const.pv@yandex.ru, npm\_sta@mail.ru,  
oglezneva.m@yandex.ru, artysh.sat@gmail.com, smirnov@imces.ru

Измерения характеристик атмосферного электричества в приземном слое проводятся уже более 150 лет, и дают информацию, как о локальном электрическом состоянии, так и о функционировании всей Глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [1–3]. Осреднённая суточная вариация градиента потенциала электрического поля, известная как унитарная вариация, которая соответствует универсальному времени и не зависит от места измерения, представляет собой глобальный ежедневный вклад электрической активности в районах нарушенной погоды [4, 5]. Однако, вклад региональных и локальных факторов может существенно влиять на фоновые значения градиента потенциала и их суточные вариации в различных регионах земного шара [5–11]. В частности, сильное влияние на электрическое состояние приземного слоя оказывает содержание аэрозольных частиц в атмосфере (особенно мелкодисперсных) и атмосферные явления, ухудшающие видимость [12–15]. Поскольку электрическое состояние атмосферы может сильно варьироваться из-за различных природных и антропогенных факторов, для изучения функционирования ГЭЦ необходим мониторинг и анализ изменчивости электрических величин в различных регионах Земли [16]. С другой стороны, высокая чувствительность приземного электрического поля к локальным условиям может быть использована для решения обратной задачи – получение информации о состоянии атмосферы и происходящих в ней процессах на основе их отклика в электрическом поле, для реализации которой также необходимо получение надёжных оценок изменчивости электрического поля в конкретном пункте. Цель данного исследования – анализ связи приземного электрического поля и интегрального содержания аэрозоля в столбе атмосферы на примере г. Томска.

Исследование было основано на данных приземного электрического поля и прозрачности атмосферы, полученных в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС) [<https://www.imces.ru/index.php?rm=news&action=view&id=899>] за 2006–2020 гг. ГО ИМКЭС располагается в восточной части г. Томска (56,48°с.ш. и 85,05°в.д.) на высоте 167 м н.у.м. Измерение градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\phi$ ) в ГО ИМКЭС с 2006 по 2017 г. выполнялись с помощью флюксметра «Поле-2» (ГГО им. А.И. Воейкова, СССР), а с 2015 г. по настоящее время – флюксметром «CS110» (Campbell Scientific, США). Прозрачность воздуха рассчитывалась на основе данных многоканального фильтрового радиометра NILU-UV-6T (NILU, Норвегия). Радиометр NILU-UV-6T измеряет энергетическую освещённость в ультрафиолетовой и видимой спектральных областях (305, 312, 320, 340 и 380 нм и в диапазоне 400–700 нм). Прилагаемое к прибору программное обеспечение позволяет рассчитывать прозрачность атмосферы на длине волны 340 или 380 нм ( $CLT$ ), обусловленную облачностью и аэрозолями. Поскольку в условиях «хорошей погоды» наличие нижней облачности исключается, то изменение  $CLT$  обусловлено, главным образом, изменением содержания аэрозоля в столбе атмосферы. В данной работе использованы данные  $CLT$ , рассчитанные для 380 нм:  $CLT_{380} = E_{e(изм.)} / E_{e(ясно)} \cdot 100\%$ , где  $E_{e(изм.)}$  и  $E_{e(ясно)}$  – измеряемая и модельная (ясное небо) энергетическая освещённость.



Дополнительно привлекались данные численного рассчитанных характеристик интегрального содержания аэрозоля в атмосфере из реанализа CAMS (EAC4), созданного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Данные CAMS (EAC4) доступные на сервере Copernicus [<https://climate.copernicus.eu/about-us>]. Были использованы данные за 2006–2022 гг. аэрозольной оптической толщины на длине волны 550 нм ( $AOD_{550}$ ) пылевого аэрозоля и аэрозоля морской соли, вертикально интегрированной массы ( $VIM$ ) пылевого аэрозоля (частиц 0,03–0,55 и 0,55–9 мкм) и аэрозоля морской соли (частиц 0,03–0,5 и 0,5–5 мкм).

Для отбора, обработки, статистического анализа и визуализации экспериментальных данных ( $\nabla\varphi$  и  $CLT_{380}$ ), зарегистрированных на ГО ИМКЭС, а также данных реанализа CAMS в ближайшем к ГО ИМКЭС узле сетке был разработан программный код (скрипт) на языке программирования MATLAB (The Mathworks, Inc.). Для анализа изменчивости  $\nabla\varphi$  и  $CLT_{380}$  в электрически невозмущённых атмосферных условиях отбирались среднeminутные значения  $\nabla\varphi$  в интервалах времени, соответствующих условиям «хорошей погоды»: количество облаков не более 5 баллов; отсутствуют облачность нижнего яруса и облака вертикального развития; отсутствуют грозы, осадки, туман, мгла, метель, пыльная буря и задымление; средняя скорость ветра не более 6 м/с. Для отбора использовались данные синоптических наблюдений за облачностью и явлениями на гидрометеорологической станции «Томск» (WMO ID 29430), расположенной в 6 км от ГО ИМКЭС.

Рассмотрим основные полученные результаты. Сезонную изменчивость  $\nabla\varphi$  в электрически невозмущённых атмосферных условиях («хорошей погоды») в Томске можно приближённо описать простой волной с минимумом летом и максимумом зимой, что, в целом, хорошо согласуется с оценками, полученными для других регионов земного шара (рис. 1а). При сравнительном анализе внутригодовой динамики невозмущённого электрического поля и характеристик интегрального содержания аэрозоля отмечено, что сезонные вариации  $\nabla\varphi$ , в целом, согласуются с сезонными вариациями характеристик интегрального содержания аэрозоля в атмосфере (рис. 2 панели а, в, д). Летнему минимуму  $\nabla\varphi$  соответствуют минимальные значения  $CLT_{380}$  (максимальная замутнённость атмосферы) и повышенные значения  $AOD_{550}$  и  $VIM$ . При этом  $AOD_{550}$  и  $VIM$  достигают максимума в апреле, когда в Томске, как правило, отмечается быстрое таяние и исчезновение снежного покрова.

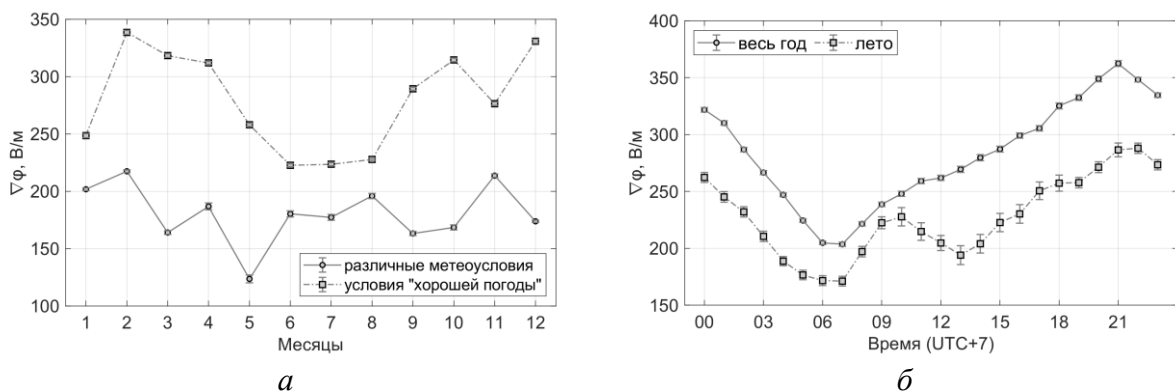


Рисунок 1. Многолетний годовой ход  $\nabla\varphi$  (а) и среднегодовой и средний летний суточный ход  $\nabla\varphi$  (б) в условиях «хорошей погоды» в г. Томске.

Среднегодовой суточный ход  $\nabla\varphi$  в электрически невозмущённых атмосферных условиях в Томске, в целом, имеет вид простой волны (рис. 1б) с утренним минимумом (~ 7 ч) и вечерним максимумом (~ 21 ч). В летние месяцы в суточном ходе появляются

вторичный максимум ( $\sim 10$  ч) и минимум ( $\sim 13$  ч), предположительно, связанные с конвективным генератором [5]. Во время основного минимума  $\nabla\varphi$  отмечаются максимальные значения  $AOD_{550}$  и  $VIM$  и минимальные значения  $CLT_{380}$ , а во время основного максимума  $\nabla\varphi$  – минимальные значения  $AOD_{550}$  и  $VIM$  (рис. 2, панели  $z$   $e$ ). В период интенсивного прогрева подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха отмечается постепенное возрастание прозрачности атмосферы и снижение её запылённости, связанные с переносом и перераспределением аэрозольных частиц посредством конвективных и турбулентных потоков. В этот период отмечается быстрый рост электрического поля, который продолжается до  $\sim 10$  ч. Затем происходит падение  $\nabla\varphi$  вплоть до  $\sim 13$  ч. При этом вторичному минимуму  $\nabla\varphi$  соответствует максимальные значения  $CLT_{380}$  (рис. 2, панель  $б$ ).

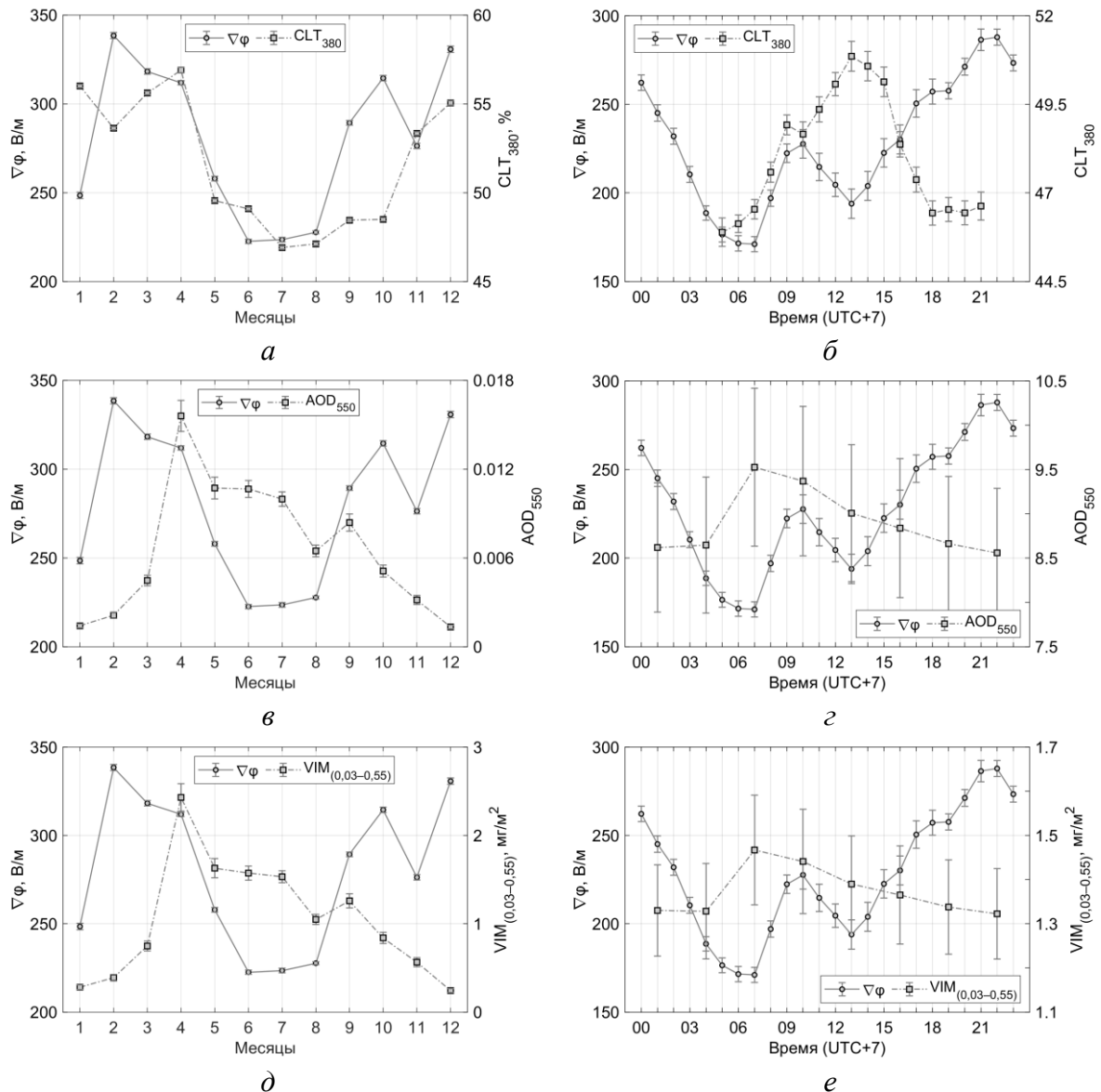


Рисунок 2. Согласованные сезонные (а, в, д) и летние суточные (б, з, е) вариации  $\nabla\varphi$  и прозрачности атмосферы (а, б), оптической толщины (в, з) и вертикально интегрированной массы пылевого аэрозоля 0,03–0,55 мкм (д, е) в г. Томске.

Таким образом, можно сделать вывод, что как годовой, так и суточный ход  $\nabla\varphi$  в г. Томске в значительной степени обусловлен изменением содержания аэрозоля в столбе

атмосферы, в особенности в тёплый период года, когда снежный покров в регионе отсутствует и имеет место активное поступление в атмосферу аэрозольных частиц почвенного и органического происхождения. Предположительно, увеличение интегрального содержания аэрозоля (оптической тощи) приводит к увеличению электрического сопротивления столба атмосферы что, в свою очередь, вызывает снижение градиента потенциала электрического поля в приземном слое.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН, проект FWRG-2021-0001 (номер госрегистрации 121031300154-1).

1. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 420 с.
2. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоёв атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометиздат, 1972. 323 с.
3. Israël H. Atmospheric Electricity. Vol 2 (Fields, charges, currents). Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1973. 365 p.
4. Harrison R. G. The Carnegie Curve // *Surveys in Geophysics*. 2013. V. 34 P. 209–232.
5. Anisimov S. V., Galichenko S. V., Shikhova N. M., Afinogenov K. V. Electricity of the convective atmospheric boundary layer: field observations and numerical simulation // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. P. 390–398.
6. Adzhiev A. K., Kupovykh G. V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. V. 51. P. 633–638.
7. Ahmad N., Gurmani S. F., Basit A. et al. Impact of local and global factors and meteorological parameters in temporal variation of atmospheric potential gradient // *Advances in Space Research*. 2021. V. 67. P. 2491–2503.
8. Bennett A. J., Harrison R. G. Variability in surface atmospheric electric field measurements // *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. V. 142. P. 012046.
9. Pustovalov K. N., Nagorskiy P. M., Oglezneva M. V., Smirnov S. V. The Electric Field of the Undisturbed Atmosphere in the South of Western Siberia: A Case Study on Tomsk // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 614.
10. Tacza J., Raulin J.-P., Morales C. et al. Analysis of long-term potential gradient variations measured in the Argentinian Andes // *Atmospheric Research*. 2021. V. 248. P. 105200.
11. 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. P. 119–125.
12. Harrison R.G. Aerosol-induced correlation between visibility and atmospheric electricity // *Journal of Aerosol Science*. 2012. V. 52. P. 121–126.
13. Nagorskiy P.M., Pustovalov K.N., Smirnov S.V. Smoke Plumes from Wildfires and the Electrical State of the Surface Air Layer // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2022. V. 35, №. 4. P. 387–393.
14. Silva H. G., Conceição R., Melgão M. et al. Atmospheric electric field measurements in urban environment and the pollutant aerosol weekly dependence // *Environmental Research Letters*. 2014. V. 9. P. 114025.
15. Yair Y, Katz S., Yaniv R., Ziv B., Price C. An electrified dust storm over the Negev desert, Israel // *Atmospheric Research*. 2016. V. 181. P. 63–71.
16. Nicoll K. A., Harrison R. G., Barta V. et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 184. P. 18–29.

## ЗАВИСИМОСТЬ СЕЗОННОГО РАЗВИТИЯ СОЮЗНОГО КОРОЕДА *IPS AMITINUS* EICHN. ОТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Смирнов Н.А., Керчев И.А.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
niknov918@gmail.ru, ivankerchev@gmail.com

Союзный короед *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) – инвазионный вид европейского происхождения, впервые идентифицированный в Западной Сибири в 2019 г. [Керчев и др., 2019].

Значительная дизъюнкция ареала союзного короеда на территории России, один из показателей антропогенного характера распространения вредителя [Керчев и др., 2021]. Природные условия обитания короеда помимо кормовых пород в первичном и вторичном ареалах имеют ряд значимых отличий в климатических и орографических условиях, от умеренного, континентально-океанического в странах Европы с выраженной высотной поясностью [Jurc and Bojovic, 2006; Witrylak, 2008; Holuša, et al., 2012; Jeger et al., 2017], до континентально-циклонического, равнинного в условиях Западной Сибири [Евсеева, 2001].

Первичный ареал союзного короеда охватывает южную, центральную и северные части Европы. Экспансию *I. amitinus* на север в Фенноскандию связывают прежде всего с климатическими изменениями [Økland et al., 2019].

Биология чужеродного вида и, в частности, его фенология как основа для прогнозирования дальнейшего распространения вредителя остаются практически неизученными во вторичном ареале, по этой причине целью нашей работы было исследование зависимости развития союзного короеда от температурных условий.

Для определения термического порога активности союзного короеда проведен эксперимент, в котором была установлена температура выхода жуков из лесной подстилки. Для определения температурного порога активности до начала массового лёта жуков в очаге союзного короеда собрано 2 образца лесной подстилки с площадок 25×25 см и помещены в пластиковые садки в термостаты ТСО-1/80 СПУ с температурными режимами 5°C и 15°C.

Натурные фенологические наблюдения за *I. amitinus* проводились в кедровниках Томской области, Томского района, Томского лесничества с весны 2019 г. по осень 2022 г. в период с конца марта-начала апреля, когда среднесуточная температура поднималась выше 0°C, а дневная превышала 5°C. Суммы активных и эффективных температур развития короеда рассчитывались по Мельниковой [1960].

Температурный оптимум и сроки развития одной генерации короеда установлены весной 2021 года, в контролируемых условиях в термокамерах на заселённых отрезках кедр. С началом массового лёта союзного короеда, было собрано 9 снеголомных отрезков кедр сибирского со вточившимися жуками, диаметром 4-5см и длиной 25-30см. Отрезки помещены по 3шт в вентилируемые термостаты с поддерживаемыми температурными режимами 15°C, 23°C и 30°C.

Данные обрабатывались методами описательной статистики в Microsoft Excel 2016 и приведены в виде средних значений со стандартным отклонением (Mean±SD).

В результате фенологических наблюдений определен термический порог активности союзного короеда, который составил 5°C. Дальнейший расчёт активных и эффективных температур фаз развития проводился на от данного порогового значения.

Зимовка союзного короеда проходит как в лесной подстилке, под отработанными деревьями кедра сибирского, так и под корой ветвей, в местах развития жуков.

На сроки выхода жуков из мест зимовки влияют погодные условия и продолжительность зимнего периода с ноября по март. Весенний выход из лесной подстилки и ветвей каждый год сопровождался несколькими днями с сухой и тёплой погодой, и дневными температурами, превышающими 10°C.

За четырехлетний период наблюдений средняя эффективная температура до начала лёта составила 142±41°C. Установлено, что от момента образования семей, до обнаружения первых молодых жуков сумма эффективных температур составляла – 460±64°C. Срок развития одного поколения короедов, согласно натурным наблюдениям, занимает  $M_e = 48$  (43–49) дней. При этом, по всей видимости, влажность оказывает существенное влияние на длительность развития. Так в 2021 году первое поколение развивалось 44 дня при температуре 13.7 °C и сумме осадков 132 мм, а тоже поколение в 2020 году 49 дней при температуре 13.8°C и 148 мм осадков.

Отношения всех положительных температур в летнем сезоне к температурам полного цикла развития короеда указывает на вероятность образования трех основных генераций в год при прочих благоприятных погодных условиях (Таблица 1).

**Таблица 1. Активные и эффективные температуры общего цикла развития союзного короеда.**

Активные температуры 2019-2022	
Общий цикл развития – 692.3°C от закладки галерей до имаго при >t 5	
Всего ср. сут. t в сезоне – 2313.5°C	
Отношение температур =	3.36±5
Эффективные температуры 2019-2022	
Общий цикл развития – 459.8°C от закладки галерей до имаго при >t 5	
Всего ср. сут. t в сезоне – 1530°C	
Отношение температур =	3.37±5

В 2019 году срок развития короеда от начала лёта, до появления первых молодых жуков составил 43 дня, при этом лёт короеда начался довольно поздно. Благодаря позднему выходу из подстилки и соответственно позднему лёту короеду удалось избежать ранневесенних перепадов температур, присущих региону инвазии. Среднесуточная температура во время развития первой генерации союзного короеда в 2019 составила 15°C.

Натурные наблюдения в 2019 году совпали с лабораторным экспериментом, когда в ходе выращивания союзного короеда при постоянной среднесуточной температуре удалось выяснить сроки развития от заселения отрезка до появления имаго: при температуре 30°C полный цикл развития короеда составил 20 суток; при температуре 23°C наблюдались самые быстрые сроки развития – 18 суток; при температуре в 15°C срок развития резко увеличивается и уже составляет – 43 суток.

Основываясь на полученных результатах, можно сказать, что союзному короеду в инвазионном ареале достаточно количества тепла для образования до трех основных генераций в сезоне. Этот показатель выше, чем в первичном ареале в Польше, где вид образует лишь одну генерацию [Mazur и Kuźmiński 2013; Witrylak 2008], что может быть причиной стремительного нарастания численности во вторичном ареале.

Установленные нами предварительные данные, по фенологии чужеродного вредителя важны для планирования санитарных мероприятий и прогноза численности вредителя на территории Западной Сибири.

1. Holuša J., Lukášová K., Grodzki W., Kala E., Matoušek P. 2012. Is *Ips amitinus* (Coleoptera: Curculionidae) Abundant in Wide Range of Altitudes? *Acta Zoologica Bulgarica*, 64 (3), 219–228.
2. Mandelshtam M. Yu. Current status of *Ips amitinus* Eichh. (Coleoptera, Scolytidae) in North-West Russia // *Entomologica Fennica*. 1999. Vol. 10, № 1. P. 29–34.
3. Mazur, A. & Kuźmiński, R. (2013) Phenology of development and population characteristics of the small spruce bark beetle *Ips amitinus* (Eichh.) in the Karkonoski National Park. *Folia Forestalia Polonica*, 55, 89– 96.
4. Jurc M., Bojović S. 2006. Bark beetle outbreaks during the last decade with special regard to the eighttoothed bark beetle (*Ips amitinus* Eichh.) outbreak in the Alpine region of Slovenia. In: Biotic damage in forests. Proceedings of the IUFRO (WP7.03.10).
5. Jeger M., Bragard C., Caffier D., Candresse T., Chatzivassiliou E., Dehnen-Schmutz K., Gilioli G., Miret J., MacLeod A., Navarro M., Niere B., Parnell S., Potting R., Rafoss T., Rossi V., Urek G., Bruggen A., Werf W., West J., Winter S., Kertesz V., Aukhojee M. and Gregoire J.-C. Pest categorisation of *Ips amitinus*. *EFSA Journal* 2017. 15(10):5038.
6. Økland B., Schroeder M., Zach P., Cocos D., Martkainen P., Siitonen Ju., Mandelshtam M. Yu., Musolin D. L., Neuvonen S., Vakula J., Nikolov Ch., Lindelöw A., Voolma K. Range expansion of the small bark beetle *Ips amitinus*: a newcomer in Northern Europe // *Agricultural and Forest Entomology*. 2019. P. 1– 12.
7. Voolma K., Mandelshtam M. Yu., Shcherbakov A. N., Yakovlev E. B., Ounap H., Suda I., Popovichev B. G., Sharapa T. V., Galasjeva T. V., Khairetdinov R. R., Lipatkin V. A., Mozolevskaya E. G. Distribution and spread of bark-beetles (Coleoptera: Scolytidae) around the Gulf of Finland: A comparative study with note on rare species of Estonia, Finland and North-Western Russia // *Entomologica Fennica*. 2004. Vol. 15, № 4. P. 198–210.
8. Witrylak M. 2008. Studies of the biology, ecology, phenology, and economic importance of *Ips amitinus* (Eichh.) (Col., Scolytidae) in experimental forests of Krynica (Beskid Sądecki, southern Poland). *Acta Scientiarum Polonorum Silvorum Colendarum Ratio et Industria Lignaria*, 7 (1), 75–92.
9. Евсеева Н.С. География Томской области. Природные условия и ресурсы/ Н.С. Евсеева. – Томск: Изд-во Том. Ун-та, 2001. – 223 с.
10. Керчев И.А., Кривец С.А., Бисирова Э. М. Смирнов Н.А. Распространение Союзного короеда *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) в Западной Сибири // *Российский журнал биологических инвазий*. – 2021. – Т. 14. – № 4. – С. 77-84. – DOI 10.35885/1996-1499-2021-14-4-77-84.
11. Керчев И.А., Мандельштам М.Ю., Кривец С.А., Илинский Ю.Ю. Союзный короед *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (*coleoptera, curculionidae: scolytinae*) – новый чужеродный вид в Западной Сибири. *Энтомологическое обозрение* 2019. Том 98, №3 592–599.
12. Мандельштам М. Ю., Мусолин Д. Л. Продолжающееся расширение ареала короеда *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) на северо-западе и севере России. В кн.: Ю.Н. Баранчиков (ред). *Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике*. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2016. С. 129–130.
13. Мельникова, Н.И. Биология и экология короедов типографа, двойника и гравера в подмосковных лесах / Н. И. Мельникова // *Сб. работ по лесн. хоз-ву / ВНИИЛМ*. – М., 1960. – Вып. 43: Лесозащита. – С. 19-45.

## ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ СЕВЕРА В УСЛОВИЯХ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИОННОЙ НАГРУЗКИ: ДАННЫЕ БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

*Сухарева Т.А.<sup>1</sup>, Ершов В.В.<sup>1</sup>, Иванова Е.А.<sup>1</sup>, Поликарпова Н.В.<sup>2</sup>, Крюкова С.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера, Мурманская обл., г. Апатиты,  
t.sukhareva@ksc.ru

<sup>2</sup>Государственный природный заповедник «Пасвик»

Интенсивное развитие отраслей промышленности привело к повсеместному загрязнению окружающей среды, обострилась проблема изучения и сохранения лесов. Лесные экосистемы, произрастающие на северном пределе распространения, подвергаются длительному воздействию со стороны горно-металлургических предприятий.

Мурманская область – самый северный регион европейской части России, который полностью входит в Арктическую зону РФ. Более восьмидесяти лет лесные экосистемы Мурманской области подвергаются интенсивному воздействию воздушного промышленного загрязнения, которое распространяется на значительные расстояния. Основными источниками атмосферных выбросов являются металлургические комбинаты «Североникель» и «Печенганикель» (АО "Кольская горно-металлургическая компания"). Загрязняющими веществами, оказывающими влияние на функционирование лесных биогеоценозов, являются кислотообразующие соединения серы и азота, а также соединения тяжелых металлов (никель, медь, кобальт, свинец, кадмий).

Для прогнозирования динамики биогеохимических циклов элементов в лесах и разработки мероприятий, направленных на повышение их устойчивости в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов, необходимы оценки пространственного варьирования состава и свойств атмосферных выпадений, почв, почвенных вод, растительного покрова с учетом многолетних изменений.

Цель работы – оценка химического состава атмосферных выпадений, почвы и почвенных вод, древесных растений на разных стадиях техногенной дигрессии северотаежных лесов в условиях снижения эмиссионной нагрузки.

Полевые исследования были проведены на мониторинговых площадях постоянного наблюдения Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН в Мурманской области. Пробные площади представляют собой разные стадии техногенной дигрессии северотаежных лесов: фон, дефолирующие леса и техногенные редколесья, расположены по градиенту загрязнения от комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» на различном удалении от источника загрязнения.

На фоновой территории за период с 1999 по 2020 гг. в подкروновых и межкروновых пространствах северотаежных лесов обнаруживается тренд увеличения концентраций Ni, что наиболее ярко выражено в сосновых лесах (Ershov et al., 2022). Это может объясняться повышением уровня содержания поллютантов в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния, что свидетельствует о возрастании техногенных нагрузок (Park, Dam, 2008; Wang, Biswas, 2010). Фоновое содержание никеля и меди в ассимилирующих органах ели и сосны составляет 1–4 мг/кг. Так, средняя концентрация Cu в хвое ели изменяется от  $2.9 \pm 0.1$  мг/кг в хвое текущего года до  $1.8 \pm 0.1$  мг/кг в многолетней хвое, Ni – от  $3.9 \pm 0.4$  до  $2.3 \pm 0.2$  мг/кг соответственно. Содержание Cu в хвое сосны текущего года составляет  $2.8 \pm 0.3$  мг/кг, в многолетней –  $1.9 \pm 0.2$  мг/кг, Ni –  $1.8 \pm 0.2$  и  $2.3 \pm 0.2$  мг/кг соответственно (Сухарева и др., 2019). Представленные данные свидетельствуют, что в фоновых условиях хвоя сосны отличается более высоким содержанием меди, хвоя ели текущего года – никеля. Эти металлы являются необходимыми для нормального функ-

ционирования растений микроэлементами, но при избытке в окружающей среде оказывают токсическое действие. В фоновых условиях содержание никеля и меди в почве низкое и варьирует в органогенном горизонте в пределах 0.25- 0.67 мг/кг, в минеральных горизонтах – 0.02-0.50 мг/кг (Сухарева, 2022).

В дефолирующих сосновых лесах в подкروновых пространствах обнаруживаются тренды снижения концентраций меди в дождевых водах от 0,14 до 0,04 мг/л. (Ershov et al., 2022). Других значимых трендов в многолетней динамике концентраций основных поллютантов в дожде в дефолирующих лесах не обнаружено. В техногенных редколесьях значимых многолетних трендов концентраций Cu, Ni и  $SO_4^{2-}$  в дождевых водах не обнаружено.

В дефолирующих лесах в водах из почвенных горизонтов А0 в подкроновых пространствах проявляются тренды увеличения концентраций Ni, Cu и  $SO_4^{2-}$  в последние годы. На данной стадии дигрессии отмечено снижение концентраций сульфатов в водах из органогенных почвенных горизонтов в межкروновых пространствах ельника от 10 до 5 мг/л и сосняка от 10 до 2 мг/л. В еловых лесах наблюдается снижение концентраций сульфатов в почвенных водах от 43 до 18 мг/л (горизонты Е+В) и от 20 до 13 мг/л (горизонта ВС). В техногенных редколесьях в почвенных водах отмечаются тенденции снижения концентраций основных поллютантов (Cu, Ni,  $SO_4^{2-}$ ). Наиболее значимые тренды снижения концентраций меди, никеля и сульфатов отмечаются в водах из органогенного почвенного горизонта в еловом редколесье в подкроновых и межкроновых пространствах. Наблюдаемые тенденции снижения концентраций основных поллютантов на стадии техногенного редколесья могут свидетельствовать о снижении выпадений загрязняющих веществ в составе крупных частиц вблизи комбината.

В условиях атмосферного загрязнения наблюдаются значительные изменения в поглощении поллютантов древесными растениями, что отражает состав ассимилирующих органов. Многолетние исследования (1991-2019 гг.) содержания тяжелых металлов в ассимилирующих органах хвойных деревьев на пробных площадях биогеохимического мониторинга показали, что в хвое сосны разного возраста достоверно снизилось содержание никеля и меди на всех стадиях техногенной дигрессии лесов. В хвое ели также выявлено достоверное снижение никеля и меди в непосредственной близости от источника загрязнения, в техногенном редколесье (рис.3). В дефолирующих лесах концентрации меди в хвое ели снизились в 2-4 раза по сравнению с уровнем 1991 г. Ранее нами было выявлено что, несмотря на снижение объёмов выбросов, в почве сохраняются высокие концентрации никеля и меди. В большинстве случаев их содержание остается сопоставимым с уровнем 1991-1992 гг., или их концентрации возрастают (Сухарева, 2013, 2022). Усиление загрязнения почв тяжелыми металлами в зоне влияния комбинатов цветной металлургии, показано и другими исследователями (Воробейчик, 2014; Лянгузова, 2016).

Таким образом, несмотря на снижение загрязняющих веществ, входящих в состав выбросов комбинатом «Североникель», в северотаежных лесах многолетняя динамика концентраций основных поллютантов в атмосферных выпадениях и почвенных водах на фоновой территории и в дефолирующих лесах демонстрирует значимые тренды их увеличения, что наиболее ярко выражено для концентраций никеля. Это может быть обусловлено повышением концентраций никеля в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния. Следует отметить снижение концентраций основных поллютантов в атмосферных выпадениях и почвенных водах техногенных еловых и сосновых редколесьях, что может свидетельствовать об уменьшении выпадений загрязняющих веществ в составе более крупных частиц вблизи комбината. Происходит накопление тяжелых металлов фотосинтезирующих органов хвойных деревьев в условиях атмосферного загрязнения, в том числе на значительном расстоянии от источников выбросов. В связи



с сокращением выбросов загрязняющих веществ в атмосферу наблюдаются выраженные тенденции снижения концентраций тяжелых металлов и серы в хвое древесных растений. Наиболее отчетливые тенденции многолетней динамики металлов, связанные со снижением выбросов, выявлены в техногенных редколесьях.

В зоне влияния комбината «Печенганикель» биогеохимические исследования лесных экосистем проводятся с 1991 г. на постоянных пробных площадях, расположенных в сосновых и березовых лесах.

Изучение содержания поллютантов в различных компонентах северотаежных лесов в районе расположения комбината «Печенганикель» представляют особый интерес в связи с закрытием плавильного цеха в декабре 2020 г. Это дает возможность оценить современное состояние и реакцию экосистем на снижение эмиссионной нагрузки. Оценка состояния лесов на начальном этапе после сокращения выбросов загрязняющих веществ показала, что в сосновых лесах сохраняются высокие концентрации тяжелых металлов и соединений серы в различных компонентах лесных биогеоценозов. Сравнение периода активной работы комбината с периодом закрытия плавильного цеха выявило снижение концентраций Ni, Cu, Co, Pb и Cd в атмосферных выпадениях, Cu, Co, Pb – в почве, Cd и Pb – в хвое сосны. В непосредственной близости к источнику загрязнения аномально высокими остаются концентрации Ni и Cd в почве, Ni – в хвое.

На территории государственного природного заповедника «Пасвик», который находится на существенном удалении (73 км) от источника атмосферного загрязнения – металлургического комбината «Печенганикель», содержание тяжёлых металлов (Cu, Ni, Cd, Pb) в листьях берёзы соответствует региональному фону. В хвое сосны выявлено повышенное содержание никеля и меди, что подтверждает индикаторные свойства данной древесной породы в условиях незначительного влияния атмосферных выбросов комбината. Концентрация остальных элементов минерального питания в большинстве случаев сопоставима с фоновым содержанием, за исключением марганца, что позволяет использовать территорию заповедника, как контрольную, при проведении мониторинга состояния лесных экосистем на северном пределе распространения в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов (Сухарева и др., 2022).

Дальнейшие мониторинговые исследования позволят выявить реакцию растительного покрова на изменение уровня атмосферного загрязнения.

1. Воробейчик Е. Л., Трубина М. Р., Хантемирова Е. В., Бергман И. Е. Многолетняя динамика лесной растительности в период сокращения выбросов медеплавильного завода // Экология. 2014. № 6. С. 448–458.

2. Лянгузова И. В., Гольдвирт Д. К. Фадеева И. К. Пространственно-временная динамика загрязнения Al-Fe-гумусового подзола в зоне влияния комбината цветной металлургии // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1261-1276.

3. Сухарева Т. А. Пространственно-временная динамика микроэлементного состава хвойных деревьев и почвы в условиях промышленного загрязнения // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. № 6. 2013. С. 19-28.

4. Сухарева Т.А. Особенности накопления химических элементов древесными растениями северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 438–441.

5. Сухарева Т.А. Исследование элементного состава почвы и растений в лесных экосистемах Лапландского заповедника // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». – 2022. – № 11/2. – С. 49-59.

6. Сухарева Т. А., Ершов В. В., Исаева Л. Г., Шкондин М. А. Оценка состояния северотаежных лесов в условиях снижения промышленных выбросов комбинатом "Североникель" // Цветные металлы. 2020. № 8. С. 33-41.

7. Сухарева Т.А., Исаева Л.Г., Ершов В.В., Поликарпова Н.В. Изучение состояния древесных растений в заповеднике «Пасвик» (Мурманская область) // Научные исследования и экологический мониторинг на особо охраняемых природных территориях России и сопредельных стран: сборник Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2022. С. 303-308.

8. Ershov V., Sukhareva T., Isaeva L., Ivanova E. and Urbanavichus G. Pollution-induced changes in the composition of atmospheric deposition and soil waters in coniferous forests at the northern tree line // Sustainability. 2022. Vol. 14. 15580.

9. Park, K. Characterization of metal aerosols in PM10 from urban, industrial, and Asian Dust sources / K. Park, D. D. Hung // Environmental Monitoring and Assessment. 2008. V. 160. P. 289–300.

10. Wang, Z.–M. Nickel Speciation and Aerosol Formation During Combustion of Kerosene Doped with Nickel Nitrate Aerosol in a Premixed Burner / Z.–M. Wang, P. Biswas // Aerosol science and technology. 2010. V. 33. P. 525–535.

## РИСК ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК НА СРЕДНЕТАЕЖНЫЕ ЛАНДШАФТЫ ХМАО-ЮГРА

*Федоров Д.В., Алексеева М.Н., Русских И.В., Яценко И.Г.*  
Институт химии нефти СО РАН, г. Томск, denilletti@gmail.com

На территории индустриально развитого Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО–Югры) добывается 43,7 % общероссийской нефти. За 2021 г. в ХМАО–Югре добыто 215,8 млн т нефти, в том числе, в Нефтеюганском районе – 46,7 млн т нефти. Добыча газа (природного и попутного) в автономном округе составила всего 33,5 млрд м<sup>3</sup>, при этом добыча попутного нефтяного газа – 32,8 млрд м<sup>3</sup>, объём использованного попутного нефтяного газа составил 32,2 млрд м<sup>3</sup> (95,8 % от его добычи) [1].

Площадь Нефтеюганского района ХМАО–Югра составляет 2 267 951 га, из них площадь лесных земель – 1 245 597 га, лесистость района – 55 %. Леса отнесены к Западно-Сибирскому среднетаежному равнинному лесному району таежной лесорастительной зоны с преобладанием травяных типов леса и лиственных насаждений. Как показали исследования [2], северные леса подвержены тепловым и аэрозольным загрязнениям от действующих факельных установок (ФУ) по сжиганию попутного нефтяного газа (ПНГ) на нефтегазодобывающих объектах. В связи с этим является актуальным моделирование зон риска аэрозольного загрязнения и проведение наземных исследований в зоне влияния ФУ для оценки состояния лесоболотных ландшафтов, что и определило цель данной работы.

Объектами исследования в данной работе являются ФУ, расположенные при установках предварительного сброса воды (УПСВ-3 и УПСВ-4) Мамонтовского месторождения, разрабатываемого «РН-Юганскнефтегаз» (ПАО «НК «Роснефть»). Мамонтовское месторождение расположено в центральной части Западно-Сибирской равнины, Салымско-Обской плоской террасовой болотно-таежной ландшафтной провинции. На УПСВ происходит предварительный сброс воды (до остаточного содержания воды в нефти порядка 1–10 %). Производится сепарация газа, часть которого поступает на компрессорную станцию и сдается на газоперерабатывающий завод. Остаточный газ поступает для сжигания на факел низкого давления [3].

Анализ риска аэрозольного воздействия на окружающую природную среду проводился на основе спутниковых данных в следующей последовательности:

1) Двухступенчатая классификация земельного покрова по космическому снимку (КС) Sentinel-2 средствами программы Multispec.

2) Идентификация классов земельного покрова в соответствии с полевыми описаниями и картами растительности.

3) Моделирование полей концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе в унифицированной программе расчёта загрязнения атмосферы (УПРЗА) «Экоцентр» [4]. Исходными данными для моделирования являются [3]: температура выбрасываемой газовой смеси, расход выбрасываемой газовой смеси, высота источника выброса вредных веществ над уровнем Земли, средняя скорость поступления в атмосферу газовой смеси из источника выброса и диаметр факела.

5) Ввод координат и таблиц описаний наземных исследований в программу ArcGIS.

6) Пространственное совмещение и анализ полученных данных в среде ArcGIS на вышеприведенных этапах.

В соответствии с [5] зона влияния выбросов конкретного загрязняющего вещества (j-ое загрязняющее вещество) определяется как территория, ограниченная изолинией, вне которой для любой точки местности в течение всего времени выбросов j-го загрязняющего вещества выполняется условие (1):

$$q_{пр,j} < 0,05 \text{ ПДК}_j, \quad (1)$$

где  $q_{пр,j}$  – значение приземной концентрации  $j$ -го загрязняющего вещества в атмосферном воздухе, создаваемой выбросами стационарных источников рассматриваемого объекта, оказывающего негативное воздействие на окружающую среду, в долях предельной допустимой концентрации (ПДК).

В 2021 г. в зоне влияния ФУ № 3 проводили отбор проб почвы, с целью определения содержания загрязняющих веществ. Отбор проб осуществляли с учетом преобладающей розы ветров на исследуемой территории. Были отобраны 5 проб почвы с поверхности земли на разных расстояниях от факельной установки (216 м; 486 м; 710 м; 1 037 м; 1 380 м) и 2 фоновых пробы почвы в разных биотопах (верховое болото и хвойный лес). Органическое вещество выделено из высушенной почвы (2–20 г) экстракцией 7 %-ным раствором метанола в хлороформе при 65 °С в течение 2 часов. Из полученных экстрактов выделяли углеводороды на хроматографической колонке длиной 400 мм и внутренним диаметром 20 мм, которую предварительно заполняли окисью алюминия четвертой степени активности (по Брокману) в весовом соотношении органическое вещество:  $Al_2O_3$ , равном 1:20. Элюирование проводили гексаном. Детальный анализ компонентного состава углеводородов проводили с помощью хроматомасс-спектрометра DFS фирмы Thermo Scientific (Германия).

По нашим результатам в составе выбросов наблюдаются вещества: CO,  $NO_x$ , сажа, бензапирен, метан,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , NO. Среди выбросов преобладают CO (ФУ № 1- 463,92 т/год, ФУ № 2- 102,96 т/год, ФУ № 3- 339,6 т/год). Сажа (ФУ № 1- 55,67 т/год, ФУ № 2- 12,36 т/год, ФУ № 3- 40,75 т/год).

На рисунке 1 показаны изолинии концентраций CO, наложенные на карту растительного покрова: а) от двух ФУ №№ 1, 2; б) от ФУ № 3. Расстояние от ФУ № 1 до изолинии с концентрацией CO 0,4 ПДК составляет 441 м (рис. 1 а), от ФУ № 3 до изолинии 0,2 ПДК составляет 543 м (рис. 1 б). Рассчитанные зоны влияния выбросов CO от ФУ №№ 1, 2 и ФУ № 3 до изолинии 0,05 ПДК равны: 1070 м и 664 м.

Расстояние от ФУ №№ 1, 2 и № 3 до изолинии с концентрацией  $NO_2$  0,05 ПДК составляет 600 и 412 м. Расстояние от ФУ № 3 с концентрацией NO 0,05 ПДК составляет 184 м. Изолинии концентраций для бензапирена не были построены вследствие их очень малой концентрации.

В санитарно-защитных зонах выбросы сажи превышают значения ПДК. Измеренное по построенной модели расстояние от ФУ № 1, № 2 и № 3 до 1ПДК сажи составляет 840 м и 473 м. Рассчитанное расстояние от ФУ до концентрации 0,05 ПДК равно: 1100 м для ФУ №№ 1, 2 и 1023 м для ФУ № 3.

С помощью хроматомасс-спектрометрического анализа по молекулярным массам ( $m/z$ ) были идентифицированы органические соединения:  $n$ -алканы и изоалканы ( $m/z$  57), гопаны, гопены и олеанены ( $m/z$  191), стераны ( $m/z$  217,  $m/z$  218), антрацен ( $m/z$  178), флуорантен и пирен ( $m/z$  202), хлорофенотаны ( $m/z$  235).

Хроматомасс-спектрометрический анализ показал, что в составе органического вещества почв преобладают алифатические углеводороды, их содержание варьирует от 50 % до 80 % от всех идентифицируемых соединений, с доминированием высокомолекулярных гомологов ( $C_{27}$ – $C_{33}$ ). Максимальное суммарное количество  $n$ -алканов отмечено в образце №3 (75,3 мкг/г) на расстоянии 710 м от ФУ, минимальное – в №1 (1,21 мкг/г). В почвах, отобранных в зоне влияния факела на расстоянии до 1500 м, доминирует гомолог  $C_{27}$ , кроме него большую долю составляют гомологи  $C_{25}$ ,  $C_{29}$ ,  $C_{31}$ , характерные для наземной растительности.

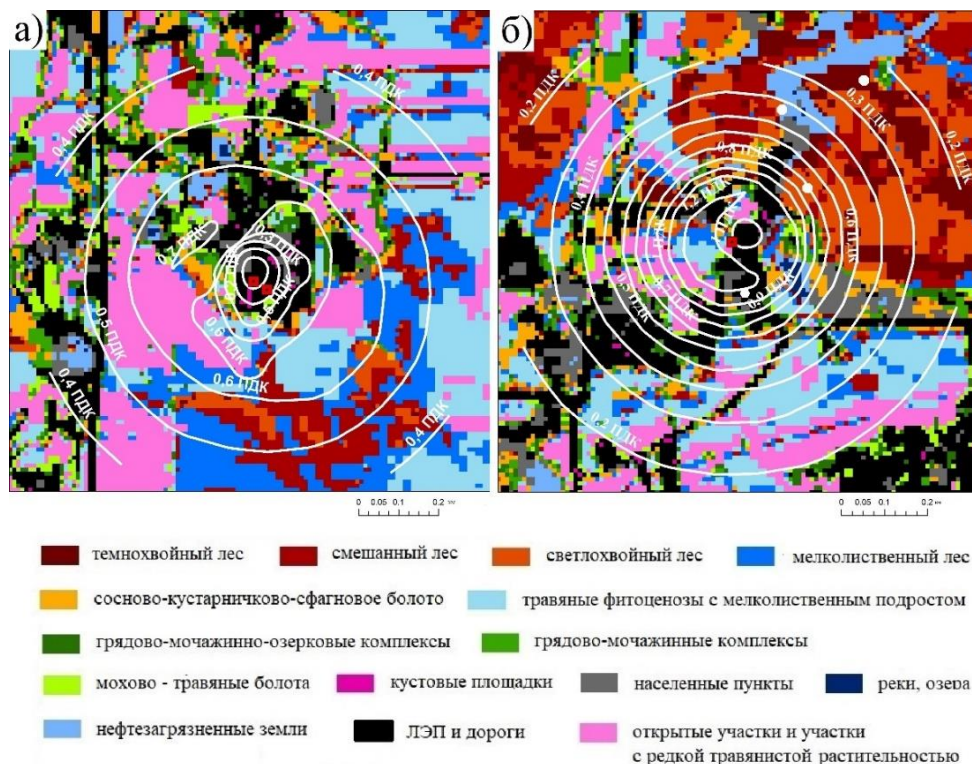


Рисунок 1. Поля рассеивания СО в атмосферном воздухе вокруг ФУ: а) №№ 1, 2; б) № 3 на Мамонтовском месторождении.

Кроме того, идентифицированы полиароматические соединения (ПАУ) – антрацен, флуорантен и пирен, которые образуются, вероятно, при сжигании газа на факельной установке. Их распределение, представленное на рисунке 2, указывает на увеличение концентрации по мере отдаления от источника загрязнения. Максимальное содержание ПАУ наблюдается в образце, удаленном на 1380 м от факела, что, вероятно, связано с их сгоранием, последующим рассеиванием в атмосфере и осаждением в почве. Кроме того, в образцах были обнаружены мононенасыщенные соединения – гопены и олеанены, характерные для природных веществ.

Во всех пробах почвы, кроме фоновых, были обнаружены хлорофенотаны, входящие в состав инсектицидов, используемых при борьбе с вредителями лесного хозяйства, их содержание выше ПДК (ПДК хлорофенотана в почвах составляет 0,1 мг/г) в 11–184 раз, за исключением образца № 1. Видимо, он попал в почву из воздуха.

В целом, рассчитанные концентрации не превышают 1ПДК за пределами санитарно-защитной зоны (1000 м) вокруг одного факела. Установлены наибольшие радиусы зон влияния выбросов СО от предприятия УПСВ-3: по концентрации СО 0,05 ПДК – 1070 м; по концентрации сажи 0,05 ПДК - 1100 м.

В результате проведенных исследований удалось обнаружить продукты горения в исследованных почвах, характерные при сжигании газа на факельной установке. При этом наблюдается постепенное увеличение содержания полиароматических углеводородов по мере отдаления от факела. В почвах был обнаружен хлорофенотан, концентрация которого превышает ПДК в несколько десятков раз.



Рисунок 2. Распределение полиароматических углеводородов в зоне влияния факельной установки.

Таким образом, в работе предложен и апробирован подход моделирования рассеивания загрязняющих веществ от ФУ с использованием спутниковых и наземных данных для анализа риска загрязнения депонирующих сред – почвенного и растительного покровов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН (НИОКТР 121031500046-7), финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

1. Доклад об экологической ситуации в Ханты–Мансийском автономном округе – Югре в 2021 году [Электронный ресурс]. URL: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/doklady-i-otchyety/doklad-ob-ekologicheskoy-situatsii-v-khanty-mansiyskom-avtonomnom-okruge-yugre/7644301/2021-god/> (дата обращения 10.03.2023).

2. Алексеева М.Н., Яценко И.Г. Спутниковый мониторинг состояния окружающей природной среды в зоне воздействия нефтегазового комплекса Томской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 158–169.

3. Филиппова Н.В. Анализ работы установки предварительного сброса воды ЦДНГ-9 НГДУ «Мамонтовнефть». Дипломный проект <https://www.math-solution.ru/referat/> (дата обращения 10.03.2023).

4. УПРЗА «ЭКО центр». Руководство пользователя : 28 с. программа УПРЗА эколог.

5. Методика разработки (расчета) и установления нормативов допустимых выбросов загрязняющих веществ, а атмосферный воздух: утверждена приказом Минприроды России от 11 августа 2020 года № 581.

---

## Секция 4

# Методы и средства мониторинга, вычислительные и информационные технологии в науках об окружающей среде

---

### ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА РАДИОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ "МЕТЕО N"

*Базарова А.С., Базаров А.В., Гармаев Б.З., Атутов Е.Б., Баикуев Ю.Б.*

Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, arunabas@mail.ru,  
alebazaro@gmail.com, bair.garmaev@gmail.com, evgeniyatutov@mail.ru, buddich@mail.ru

Неоднородность тропосферы вызывает искривление траектории луча ультракоротких радиоволн. Если разбить условно всю толщу тропосферы по высоте на большое число сферических, концентричных земной поверхности, слоев, таких, чтобы в пределах каждого диэлектрическая проницаемость воздуха  $\varepsilon$  могла рассматриваться как постоянная величина, тогда в каждом слое траектория волны будет прямолинейной, а при переходе от слоя к слою происходит её преломление. Если число слоев разбиения устремить к бесконечности, то траектория волны превращается в плавную кривую [1].

Во всех диапазонах радиоволн проводимость газов тропосферы практически равна нулю [2], таким образом, в выражении для комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$  [3] для этой среды можно отбросить мнимую часть. Тогда для определения кривизны радиолуча каждого слоя можно использовать показатель преломления (индекс рефракции)  $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ , где  $\mu = 1$  — магнитная проницаемость воздуха [4]. Так как индекс рефракции  $n$  для воздуха мало отличается от единицы на практике обычно применяется параметр  $N$ , называемый, согласно [5] просто «рефракцией», связанный с  $n$  соотношением [6]  $N = (n - 1) \cdot 10^6$ , причем:

$$N = \frac{77,6}{T} \left( P + \frac{4810 \cdot e}{T} \right), \quad (1)$$

где  $T$  — абсолютная температура, К;  $P$  — атмосферное давление, гПа;  $e$  — упругость водяного пара, гПа.

Таким образом, рефракция ультракоротких радиоволн в тропосфере зависит от метеорологического состояния этой среды. Рефракция показывает, на сколько миллионов долей индекс рефракции больше единицы. Обычно  $N$  представляет собой трехзначное число. Например, если у поверхности Земли  $n = 1,000289$ , то рефракция выражается числом 289 [6]. Единицей измерения является 1  $N$ -ед. = 1 м<sup>-1</sup>.

Одним из методов прогнозирования распространения радиоволн является создание картографических материалов рефракции [7], мировых [8], и региональных [9]. Мировые работы основаны на данных реанализа, региональные на информации метеорологических и аэрологических станций. В Рекомендациях МСЭ-R [5] рекомендуют использовать статистику продуктов во всемирном масштабе для методов прогнозирования распространения радиоволн только в том случае, если отсутствуют более надежные локальные данные.



Информационная система мониторинга радиометеорологических параметров «Метео N» предназначена для информационного обеспечения мониторинга и контроля региональных особенностей пространственно-временной динамики рефракции с целью анализа статистических показателей и построения карт по Байкальской природной территории (БПТ). Границы БПТ для данных целей аппроксимированы к границам совокупной территории Иркутской области (ИО) и Республики Бурятия (РБ). Источником данных для «Метео N» служат измерения атмосферно-почвенного измерительного комплекса (АПИК) [10], метеорологических (веб-ресурс ВНИИГМИ-МЦД «АИСОРИ», <http://aisori-m.meteo.ru>), а так же ресурсов «Расписание погоды» <https://trp5.ru/> и «Погода и климат» <http://www.pogodaiklimat.ru/>) и аэрологических станций (АЭ, ресурс FlyMeteo <https://flymeteo.org/>). Измерительные комплексы АПИК расположены на радиофизическом стационаре «Хурумша» и Лесостепном мерзлотно-экологическом стационаре «Еравнинский». Метеостанции (39 по РБ и 55 по ИО) и аэрологические станции (2 по РБ и 4 по ИО) равномерно распределены по территории БПТ.

**Таблица 1. Характеристики источников данных «Метео N».**

Источник	Кол-во	Высоты измерений, м
АПИК	2	1, 2, 4, 6, 10
Метео	94	2
АЭ	6	0, 350, 1000, 2500, 4900, 6500, 8400, 9600, 10800, 12600, 15300

Алгоритм обработки данных представлен на рисунке 1.

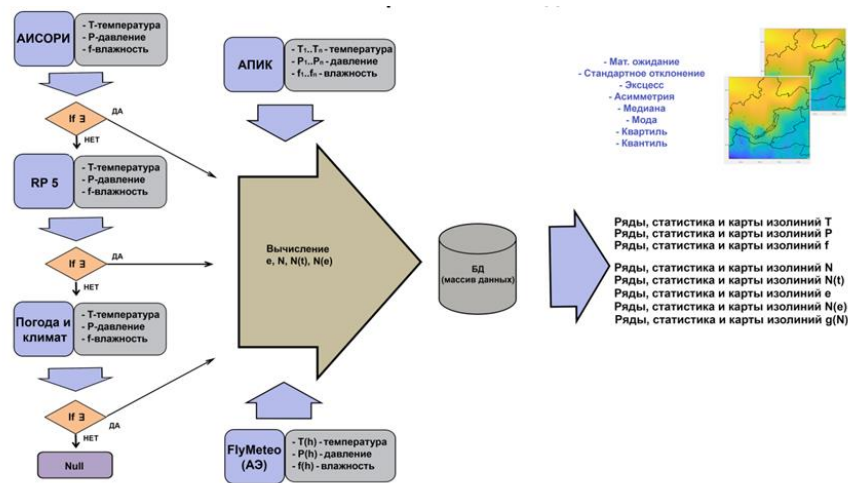


Рисунок 1. Алгоритм подсистемы обработки данных.

По измеренным на разных высотах метеоданным АПИК и АЭ по формуле (1) рассчитывается значение рефракции  $N$ . По данным метеостанций значение  $N$  на требуемых высотах восстанавливаются модулями информационной модели согласно экспоненциальному закону [11]:

$$N(h) = N_s \exp[-c_e(h - h_s)], \quad (2)$$

где  $h$  — высота в км;  $h_s$  — высота расположения станции над уровнем моря;  $N_s$  — рефракция на уровне станции;  $c_e$  — параметр, который можно найти в таблицах приложений в [4].

Кривизна траектории зависит от значения вертикального градиента диэлектрической проницаемости с увеличением высоты над Землей [1]. Градиент рефракции  $gN$  между высотами  $h_1$  и  $h_2$  вычисляется по формуле [9]:



$$gN = \frac{\Delta N}{\Delta h} = \frac{N_2 - N_1}{h_2 - h_1}. \quad (3)$$

В массивах данных информационной системы «Метео N» собрана информация по метеостанциям с 2011, АЭ с 2016 и АПИК с 2017 года. Измерения с АЭ проводятся ежедневно два раза в сутки в 00:00 и 12:00 UTC, измерения метеостанций и АПИК проводятся в стандартные метеорологические сроки 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 часов, которые для временной зоны БПТ UTC+8 составляют 02:00; 05:00; 8:00; 11:00; 14:00; 17:00; 20:00; 23:00 ч.

Типичные сутки. Для проведения статистического описания предлагается следующий метод организации данных, который мы назвали «типичные сутки». Массив данных фильтруется по месяцу и по каждому стандартному метеорологическому сроку, в результате получается 8 подмассивов данных для каждого многолетнего месяца для каждой конкретной пространственной точки измерений (станции). Таким образом, для многолетнего, например, января получают 8 подмассивов за 02:00; 05:00; 8:00; 11:00; 14:00; 17:00; 20:00; 23:00 часов. В каждом подмассиве 31 день  $\times$  5 лет = 155 значений, например, для 02:00 часов (на примере 5-летнего периода измерений). Все 8 январских подмассивов составляют «типичные» сутки января. Аналогично для каждого месяца. Далее распределение данных в каждом получившемся подмассиве необходимо проверить на соответствие нормальному закону. Если распределение данных соответствует нормальному закону, то в качестве меры центральной тенденции и меры разброса следует использовать среднее арифметическое значение данных и стандартное отклонение соответственно. Если распределение отличается от нормального, то соответственно медиану и первый ( $Q1$ ) и третий ( $Q3$ ) квартили.

На рисунке 2 показана динамика градиента рефракции  $gN$  в течение типичных суток центральных месяцев сезонов (январь, апрель, июль, октябрь) на примере 5-летнего периода измерений с 2017 по 2021 год АПИК, установленном на Радиофизическом стационаре Хурумша.

В соответствии с решением о «нормальности» составляются наборы средних (или медианных) значений с диапазонами разбросов данных ( $\pm$  стандартное отклонение  $\sigma$  или  $Q1$  и  $Q3$ ). На основании составленных наборов данных построены графики «типичной» суточной динамики градиента рефракции  $gN$ . Черные пунктирные тонкие линии на графиках показывают границы разброса значений, толстые линии — средние (медианные значения). Физический смысл графиков заключается в следующем. Стандартное отклонение является мерой разброса значений вокруг среднего арифметического и в область от  $(gN - \sigma)$  до  $(gN + \sigma)$  попадает 68%, а между 1-м и 3-м квартилями вокруг медианы располагается 50% значений признака. Таким образом, между пунктирными линиями на графиках располагается от 50 до 68% значений градиента рефракции в зависимости от типа распределения.

Значение градиента рефракции влияет на кривизну траектории радиолуча. При этом если  $gN < 0$ , то траектория распространения вдоль земной поверхности обращена выпуклостью вверх, если  $gN > 0$ , то траектория обращена выпуклостью вниз. Соответственно различают три вида тропосферной рефракции: отрицательная рефракция —  $gN > 0$ , нулевая рефракция —  $gN = 0$ , положительная рефракция, когда  $gN < 0$ , причем для нормальной атмосферы  $gN < 0 = -0,04$  1/м. Графики показывают, что в области Селенгинского среднегорья градиент принимает преимущественно положительные значения, особенно летом и осенью, что свидетельствует об отрицательной рефракции в самом нижнем десятиметровом слое приземной атмосферы, при которой траектория радиолуча обращена выпуклостью вниз. Радиоволна удаляется от поверхности Земли, а дальность видимости уменьшается [12].

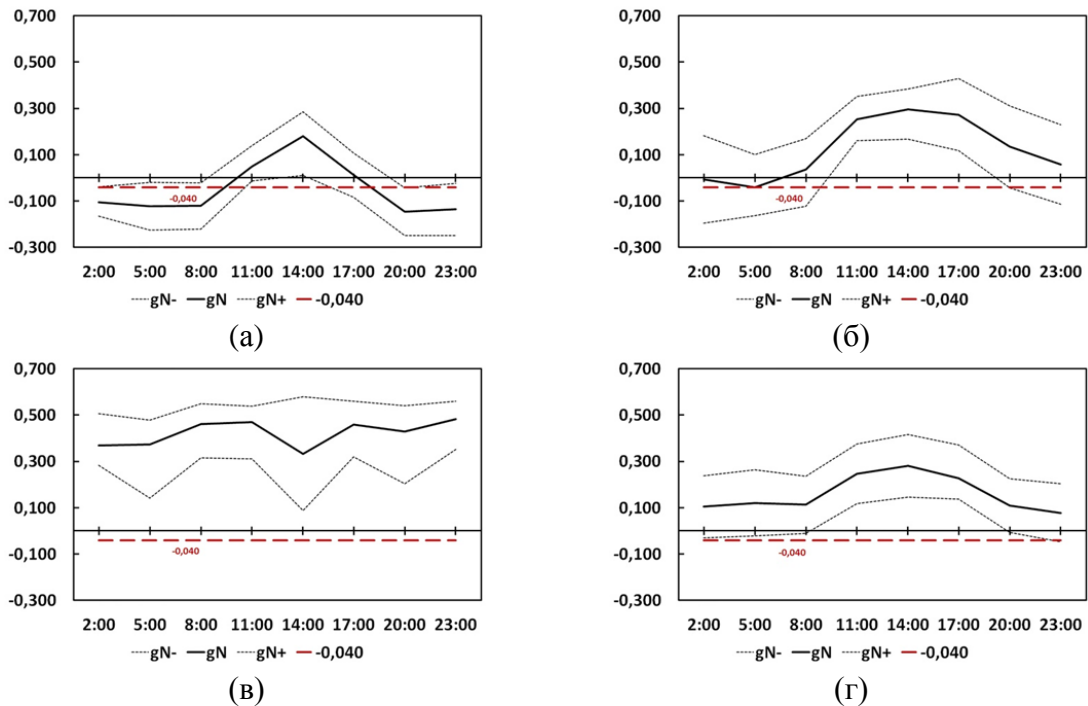


Рисунок 2. Диапазон значений градиента рефракции  $gN$  на высотах 1 м и 10 м для центральных месяцев сезонов: (а) – января, (б) – апреля, (в) – июля, (г) – октября 2017–2021 г.

Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № 0270-2023-0004 «Развитие фундаментальных основ распространения СНЧ-СДВ-ДВ-СВ и УКВ радиоволн в неоднородных импедансных каналах».

1. Кубанов В.П., Ружников В.А., Сподобаев М.Ю., Сподобаев Ю.М. Основы теории антенн и распространения радиоволн. Самара: ИНУЛ ПГУТИ, 2016. – 258 с.
2. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. Москва: Советское радио, 1972. – 464 с.
3. Шибков А.Н. Основные законы теории электромагнитного поля. Владивосток: Морской государственный университет, 2010. – 65 с.
4. Бин Б.Р., Даттон Е.Д. Радиометеорология. Гидрометиздат, 1971. – 363 с.
5. Рекомендация МСЭ-R P.453-12. Индекс рефракции радиоволн: его формула и данные о рефракции. Женева: ITU, 2017. – 25 с.
6. Цыдыпов Ч.Ц. Распространение ультракоротких радиоволн в гористой местности / ed. Виленский И.М. Новосибирск: Издательство “Наука,” 1977. – 208 с.
7. Рекомендация МСЭ-R P.1144-7. Руководство по использованию методов прогнозирования распространения радиоволн, разработанных 3-й Исследовательской комиссией по радиосвязи. Женева, : ITU, 2016. – 18 с.
8. Grabner M., Kvicera V., Pechac P. World maps of atmospheric refractivity statistics // IEEE Trans. Antennas Propag. 2014. Vol. 62, № 7. P. 3714–3722.
9. Гомбоев Н.Ц. Статистическая структура вертикальных градиентов показателя преломления атмосферы в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке России. Улан-Удэ: ИП Бальжини-маев, 2017. – 111 с.
10. Базаров А.В., Бадмаев Н. Б., Кураков С. А., Гончиков Б.-М. Н. Мобильный измерительный комплекс для сопряженного контроля атмосферных и почвенных параметров // Метеорология и гидрология. 2018. № 4. С. 104–109.
11. Мошков А.В., Пожидаев В.Н. Особенности рефракции радиоволн в приполярных районах // Радиотехника И Электроника. 2014. Том 59, № 11. С. 1085–1089.
12. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. Москва: Ленанд, 2021. – 336 с.

## ВОЗМОЖНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

Богушевич А.Я.

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
bay@imces.ru

В исследованиях приземной атмосферы широкое применение получили ультразвуковые анемометры-термометры (УАТ) [1 - 3]. С помощью этих приборов измеряют в локальном объеме воздуха не только усредненные значения температуры  $T$  и трех компонент вектора скорости ветра  $\mathbf{v}$ , но и их турбулентные флуктуации. При этом измерения флуктуаций  $T$  и  $\mathbf{v}$  выполняются с частотой повторения в несколько десятков герц и с аппаратурной чувствительностью около  $10^{-2}$  (К или м/с, соответственно). Это сделало УАТ уникальным инструментом для исследований атмосферной турбулентности. К сожалению, в настоящее время, используя данные измерений УАТ, невозможно оценивать турбулентные флуктуации влажности воздуха, статистические характеристики которой также в значительной степени определяют термодинамическое состояние атмосферы и свойства ее турбулентности.

В настоящей работе рассматриваются возможности определения параметров влажности воздуха непосредственно из акустических измерений в УАТ, используя явление дисперсии звука в атмосфере. С этой целью предлагается изменить конструкцию УАТ таким образом, чтобы в нем можно было производить измерения разностей скоростей звука  $\Delta c_{21} = c(f_2) - c(f_1)$  на отличающихся частотах  $f_1$  и  $f_2$ .

Дисперсия звука в атмосфере на частотах, не сильно превышающих 100 кГц, практически определяется только колебательной релаксацией молекул кислорода, азота и паров воды [4, 5]. При этом вклады в дисперсию звука колебательной релаксации молекул кислорода и азота сравнимы по порядку величины, в то время как влиянием колебательной релаксации молекул водяного пара практически всегда можно пренебрегать. В итоге для оценивания дисперсионного приращения скорости звука  $\Delta c = c(f) - c_0$  на частоте  $f$ , где  $c_0$  - низкочастотная (лапласова) скорость звука, можно использовать соотношение

$$\Delta c \approx \frac{2c_0 f^2}{35T^2} \left\{ \frac{(\xi_{O_2} + 7,3 \cdot 10^{-3} h) \cdot \Theta_{O_2}^2}{f_{mv,O_2}^2 + f^2} \exp\left(-\frac{\Theta_{O_2}}{T}\right) + \frac{\xi_{N_2} \Theta_{N_2}^2}{f_{mv,N_2}^2 + f^2} \exp\left(-\frac{\Theta_{N_2}}{T}\right) \right\}, \quad (1)$$

в котором частоты колебательной релаксации молекул кислорода  $f_{mv,O_2}$  и азота  $f_{mv,N_2}$  оцениваются как

$$f_{mv,O_2} = (P/1014) \left\{ 24 + 4,41 \cdot 10^4 h \cdot (0,05 + h) / (0,391 + h) \right\}, \text{ Гц}, \quad (2)$$

$$f_{mv,N_2} = (P/1014) \left\{ 9 + 6,73 \cdot 10^3 h \exp(-25,3T^{-1/3}) \right\}, \text{ Гц}. \quad (3)$$

Здесь  $T$  - температура воздуха в К;  $\xi_{O_2} = 0,209$  и  $\xi_{N_2} = 0,781$  - молярные концентрации кислорода и азота в атмосферном воздухе;  $h = e/P100$  - молярная концентрация водяного пара в атмосфере (в %);  $\Theta_{O_2} = 2239,1$  К и  $\Theta_{N_2} = 3352$  К - характеристические температуры для кислорода и азота;  $P$  - атмосферное давление (в гПа);  $e$  - парциальное давление (упругость) водяного пара (в гПа).

Расчеты показывают, что в зависимости от значения  $e$  релаксационная частота  $f_{mv,O_2}$  может изменяться очень в широком диапазоне значений от десятков и сотен герц до нескольких сотен килогерц, в то время как  $f_{mv,N_2}$  практически никогда не превышает 1 кГц. Поэтому если обе частоты  $f_1$  и  $f_2$  относятся к ультразвуковому диапазону, то раз-

ность скоростей звука  $\Delta c_{21} = c(f_2) - c(f_1)$  практически не будет зависеть от релаксации молекул азота. В результате оказывается, что если в (1) пренебречь влиянием релаксации азота, то при  $e \geq 1$  гПа и  $f_1, f_2 \geq 30$  кГц значения  $\Delta c_{21}$  не изменятся до пятой значащей цифры включительно.

Для определения параметров влажности воздуха более перспективным является трехчастотный метод, при реализации которого используются ультразвуковые сигналы с частотами  $f_3 > f_2 > f_1 \gg f_{mv, N_2}$ . В этом случае можно измерить две разности скоростей звука  $\Delta c_{21} = c(f_2) - c(f_1)$  и  $\Delta c_{32} = c(f_3) - c(f_2)$ , а затем вычислить значение безразмерного параметра  $m = \Delta c_{32}/\Delta c_{21}$ , для которого с учетом (1) имеем выражение

$$m = \frac{f_3^2 - f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \cdot \frac{f_{mv, O_2}^2 + f_1^2}{f_{mv, O_2}^2 + f_3^2}. \quad (4)$$

Параметр  $m = \Delta c_{32}/\Delta c_{21}$  замечателен тем, что его значение зависит исключительно от соотношения значений трех выбранных частот ультразвуковых сигналов ( $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ ), которые всегда известны точно, и от частоты колебательной релаксации молекул кислорода  $f_{mv, O_2}$ , описываемой (2). Поэтому используя выражение, получаемого из (4),

$$f_{mv, O_2} = f_3 \sqrt{(m - m_2)/(m_1 - m)},$$

где  $m_1 = (f_3^2 - f_2^2)/(f_2^2 - f_1^2)$  и  $m_2 = m_1 (f_1 / f_3)^2$ , можно очень точно вычислять значение  $f_{mv, O_2}$  и далее из него молярную концентрацию водяного пара в атмосфере  $h$ . Таким образом при дополнительном контроле атмосферного давления  $P$  этот метод позволяет оценивать упругость водяного пара  $e = Ph/100$  в гПа (или, учитывая также температуру воздуха, относительную влажность воздуха  $r$  в %). Рис. 1 показывает, как влияет значение  $e$  на величину параметра  $m$  при различных комбинациях выбранных частот сигнала. Основным положительным моментом здесь является то, что измеряемый параметр  $m$  всегда однозначно зависит от значения  $e$ , но при малых значениях  $e$  следует ожидать ухудшение чувствительности рассматриваемого метода.

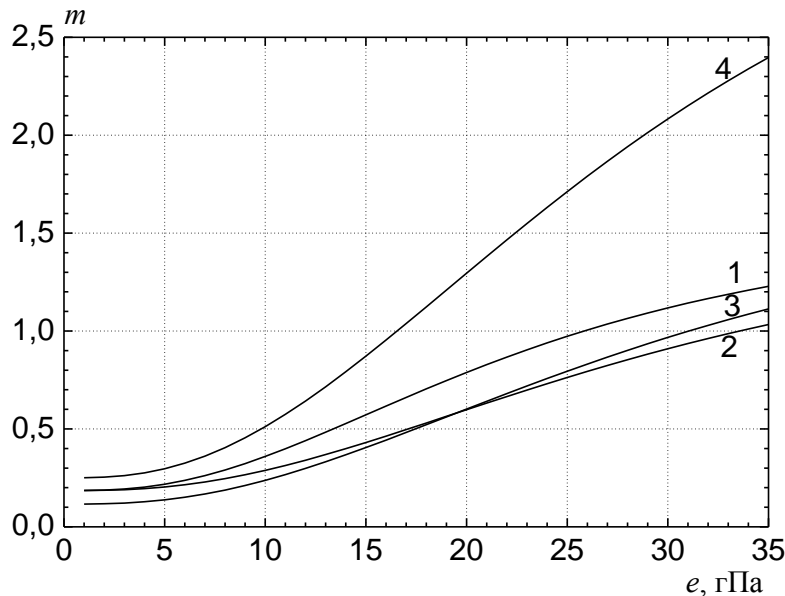


Рисунок 1. Значения безразмерного параметра  $m = [c(f_3) - c(f_2)]/[c(f_2) - c(f_1)]$  в зависимости от упругости водяного пара  $e$  в атмосфере для 5 вариантов используемых частот сигнала: 1 -  $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 90$  кГц; 2 -  $f_1 = 40$  кГц,  $f_2 = 80$  кГц,  $f_3 = 120$  кГц; 3 -  $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 75$  кГц,  $f_3 = 120$  кГц; 4 -  $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 120$  кГц.

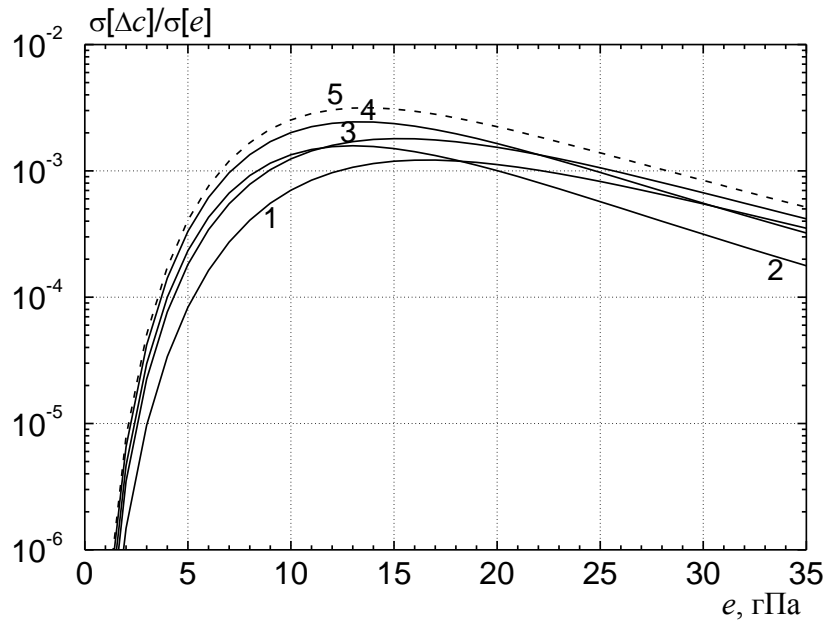


Рисунок 2. Требования к погрешности измерения разностей скоростей звука  $\Delta c_{21}$  и  $\Delta c_{32}$  для оценивания упругости водяного пара  $e$  с ошибкой не более 1 гПа в зависимости от ее значения в атмосфере для 5 вариантов используемых частот сигнала: 1 –  $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 90$  кГц; 2 –  $f_1 = 40$  кГц,  $f_2 = 80$  кГц,  $f_3 = 120$  кГц; 3 –  $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 75$  кГц,  $f_3 = 120$  кГц; 4 –  $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 120$  кГц; 5 –  $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 180$  кГц.

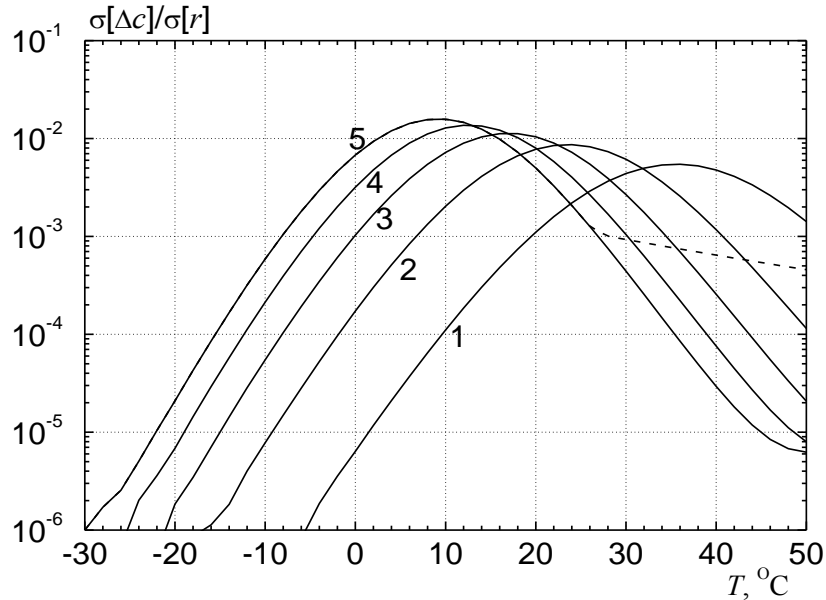


Рисунок 3. Требования к погрешности измерения разностей скоростей звука  $\Delta c_{21}$  и  $\Delta c_{32}$  для оценивания относительной влажности  $r$  с ошибкой не более 1 % в зависимости от текущей температуры воздуха  $T$  при частотах сигнала  $f_1 = 30$  кГц,  $f_2 = 60$  кГц,  $f_3 = 120$  кГц и 5 значениях  $r$ : 1 –  $r = 20$  %; 2 –  $r = 40$  %; 3 –  $r = 60$  %; 4 –  $r = 80$  %; 5 –  $r = 100$  %.

Для предлагаемого метода измерений нами также были выполнены расчеты величин  $\sigma[\Delta c]/\sigma[e]$  (см. рис. 2), которые показывают с какой погрешностью  $\sigma[\Delta c]$  необходимо

измерять разности скоростей звука  $\Delta c_{32}$  и  $\Delta c_{21}$  для того, чтобы иметь погрешность  $\sigma[e]$  оценивания  $e$ , не превышающую 1 гПа. Здесь, чем больше значение параметра  $\sigma[\Delta c]/\sigma[e]$ , тем менее жесткие требования предъявляются к точности измерений величин  $\Delta c_{32}$  и  $\Delta c_{21}$ . Аналогично также оценивалась величины  $\sigma[\Delta c]/\sigma[r]$ , которые показывают требования к погрешности  $\sigma[\Delta c]$  при определении относительной влажности воздуха с погрешностью  $\sigma[r]$ , не превышающей 1 % (см. рис. 3). При анализе данных на этих рисунках следует учитывать, что в настоящее время реально создать аппаратуру, реализующую измерения разностей скоростей ультразвука на отличающихся частотах с чувствительностью порядка  $10^{-4}$  м/с.

Как видно из рис. 2, наименьшую погрешность оценивания  $e$  на основе явления дисперсии звука можно ожидать при значениях  $e$  в атмосфере, превышающих 7 гПа, которые типичны только для летних условий. При этом значения  $e \leq 3$  гПа рассматриваемым методом практически не могут быть измерены, что обусловлено резким ухудшением в этом случае его чувствительности к оцениваемому параметру. Аналогичные выводы следуют из рис. 3. Здесь показано, что если  $\Delta c_{32}$  и  $\Delta c_{21}$  измерены с погрешностью, равной  $10^{-3}$  м/с, то величина  $r$  при любой положительной температуре будет определена данным методом с погрешностью, не превышающей 1 %. При отрицательных температурах погрешность оценивания  $r$  будет возрастать примерно на 1 % на каждый градус уменьшения температуры. В заключение отметим, что, хотя предложенный выше метод измерений параметров влажности на основе дисперсии звука практически не пригоден к применению в зимних условиях, он дает уникальную возможность прямых измерений в летний период турбулентных флуктуаций влажности воздуха.

Настоящая работа выполнена по государственному заданию ИМКЭС СО РАН.

1. International standard: ISO 16622:2002. Meteorology – Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for means wind measurements.

2. Богушевич А.Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 2. С. 170–175.

3. Тихомиров А.А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерений пульсаций скорости и температуры воздушных потоков. Обзор // Оптика атмосф. И океана. 2010. Т. 23, № 7. С. 585-600.

4. ANSI S1. 26-1978 (ASA 23-1978). American national standart: Method for the calculation of the absorption of sound by atmosphere/N.Y.: Amer. Inst. Of Phys. For Acoust. Soc. Amer. 1978. 30 p.

5. Persuit D.R. Air absorption calculations for outdoor plant // J. Sound and Vibration. 1979. V.61. N3. P.427-436.

6. Bass H.E.. Absorption of sound in air: high temperature predictions // J. Acoust. Soc. Amer..1981. V.69. N 1. P.124-138.

## ЧИСЛЕННЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСИИ ЗВУКА В АТМОСФЕРЕ НА ТЕМПЕРАТУРУ ВОЗДУХА, ИЗМЕРЯЕМУЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ТЕРМОМЕТРАМИ

*Богушевич А.Я.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
bay@imces.ru

В атмосферных исследованиях для определения температуры воздуха  $T$  давно и успешно используются измерения скорости звука  $c$ , используя ее зависимость от абсолютного значения  $T$  (в К) в виде [1]

$$c \approx 20,067\sqrt{T_v}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где  $T_v \approx c^2 / 402,7 \approx T(1 + 0,3192e/P)$  - акустическая температура;  $e$  – упругость водяного пара в воздухе, гПа;  $P$  – атмосферное давление, гПа. Здесь также учитывается через малый параметр  $e/P \ll 1$  влияние на значение  $c$  влажности воздуха, которое становится значимым только при положительных температурах  $T_C > 0$  (в °С).

Используя (1), ранее производились оценки вертикального профиля  $T$  в верхней атмосфере по рефракции низкочастотного звука от наземных взрывов [2], которая обусловлена изменениями с высотой скорости звука. При радиоакустическом зондировании [3] дистанционное определение профиля  $T$  выполняется с помощью радиолокации периодических неоднородностей воздуха, создаваемых распространяющейся вверх звуковой волной слышимого диапазона частот. В этом случае доплеровский сдвиг частоты принимаемой радиоволны пропорционален  $c$ . Измерения  $c$  для определения в локальном объеме воздуха как средних значений температуры, так и ее турбулентных флуктуаций, выполняются в ультразвуковых анемометрах-термометрах (УАТ) [4].

В атмосферном воздухе дисперсия звуковых волн (изменение их скорости  $\Delta c$  в зависимости частоты колебаний  $f$ ) в относительных величинах  $\Delta c/c$  мала. Поэтому ее игнорирование в (1) приводит при акустических измерениях температуры  $T$  к дополнительной погрешности ее оценивания  $\Delta T$ , обычно не превышающей 0,1 К. В большинстве практических случаев такое значение  $\Delta T$  не является значимым. Однако в УАТ при изучении атмосферной турбулентности измерения  $c$ , и соответственно оценивание температуры  $T$ , выполняются с аппаратурным разрешением не менее  $10^{-2}$  (м/с или К). При подобных высокочувствительных измерениях погрешность  $\Delta T$  оценивания  $T$  вследствие игнорирования дисперсии звука становится заметной.

В настоящей работе рассматривается релаксационный механизм дисперсии звука в атмосферном воздухе. Показано, что для частот, не превышающих значительно 100 кГц, величина  $\Delta c$  определяется практически только колебательной релаксацией молекул кислорода и азота. Учитывая это и связь между молекулярным поглощением звука и его дисперсией, предложен инженерный алгоритм расчета значений  $\Delta c$ . На его основе выполнен численный анализ влияния значений метеорологических параметров на ожидаемые в нижней атмосфере величины  $\Delta c$  в широком диапазоне частот. Из этих значений  $\Delta c$  легко оценить возникающие в УАТ дополнительные погрешности  $\Delta T$ , применяя соотношение  $\Delta T \approx (\sqrt{T}/10)\Delta c$  (здесь при  $T_C = +20$  °С коэффициент  $\sqrt{T}/10 \approx 1,7$ ).

Атмосферный воздух представляет собой смесь многоатомных газов ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$  и других), каждый из которых имеет свои как вращательные, так и колебательные степени свободы. В таких газах при распространении в них звуковой волны за счет ее

энергии возникают релаксационные процессы, приводящие к дисперсии звука и к его дополнительному (молекулярному) поглощению.

Известно [5, 6], что в среде, в которой наблюдается одиночный релаксационный процесс с характерным временем  $\tau_m$ , дисперсионное уравнение для звуковых волн имеет вид:

$$k = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{1 - m \frac{\omega^2 \tau_m^2}{1 + \omega^2 \tau_m^2} - im \frac{\omega \tau_m}{1 + \omega^2 \tau_m^2}}, \quad (2)$$

где  $k$  – волновое число;  $\omega = 2\pi f$ ;  $m = (c_\infty^2 - c_0^2) / c_0^2$  – безразмерный параметр максимальной глубины дисперсии;  $c_0$  – скорость звука в отсутствие дисперсии, соответствующая (1);  $c_\infty$  – ее максимальное значение на частотах  $f$ , значительно превышающих характерную частоту релаксации  $f_m = 1/(2\pi\tau_m)$ .

Из (2) следует, что в дисперсионной среде волновое число является комплексным (т.е.  $k = k_1 - i k_2$ ), в котором мнимая часть  $k_2$  является коэффициентом поглощения  $\alpha$  амплитуды волны, а его действительная часть  $k_1$  определяет ее фазовую скорость  $c = \omega/k_1$ .

Поскольку для реальных газов  $m \ll 1$ , то из (2) следует (см. также [5, 6]):

$$c = c_0 \left( 1 + \frac{m}{2} \frac{\omega^2 \tau_m^2}{1 + \omega^2 \tau_m^2} \right) \quad \text{и} \quad \alpha = \frac{m}{2c_0 \tau_m} \frac{\omega^2 \tau_m^2}{1 + \omega^2 \tau_m^2}. \quad (3)$$

Если в (3) из второго равенства записать выражение для  $m$  и подставить его в первое, то получим простые соотношения, позволяющие оценивать для каждого релаксационного процесса величину дисперсионного приращения скорости звука  $\Delta c = c - c_0$ , если известен его коэффициент поглощения  $\alpha$ :

$$\Delta c / c_0 = c_0 / (2\pi f_m) \cdot \alpha \quad \text{и} \quad \Delta c / c_0 = \lambda_m / (2\pi) \cdot \alpha, \quad (4)$$

где  $\lambda_m = c_0/f_m$ .

Суммарный коэффициент поглощения звука за счет колебательной релаксации в смеси различных газов обычно приводится в виде [7]:

$$\alpha_v = \sum_i \left\{ \frac{q_{v,i}}{\lambda_{mv,i}} \frac{2(f/f_{mv,i})^2}{1 + (f/f_{mv,i})^2} \right\}, \quad (5)$$

где суммирование производится по основным газовым компонентам воздуха,  $q_{v,i}$  – безразмерная величина максимального (при  $f = f_{mv,i}$ ) поглощения звука на дистанции  $\lambda_{mv,i}$ . Коэффициент поглощения звука за счет вращательной релаксации может быть представлен аналогично, но уже с другими параметрами  $q_{r,i}$  и  $f_{mr,i}$ , относящимися к вращательной релаксации тех же самых молекул. Поэтому с учетом (4) и (5) алгоритм вычислений дисперсии звука в смеси газов можно записать в общем виде как

$$\Delta c = \frac{c_0 f^2}{\pi} \sum_i \left\{ \frac{q_{v,i}}{f_{mv,i}^2 + f^2} + \frac{q_{r,i}}{f_{mr,i}^2 + f^2} \right\}. \quad (6)$$

Величины  $q_{v,i}$ , входящие в (6), оценивают из формулы Планка-Эйнштейна [3]

$$q_{v,i} = \frac{2\pi\xi_i}{35} \left( \frac{\Theta_i}{T} \right)^2 \exp\left(-\frac{\Theta_i}{T}\right) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\Theta_i}{T}\right) \right],$$

где  $\Theta_i$  – характеристическая температура газа в К,  $T$  – температура воздуха в К,  $\xi_i$  – молярная концентрация  $i$ -ой фракции воздуха (безразмерная). Также в (6) используют известные в литературе эмпирические соотношения для  $f_{mv}$  (см., например, [7-10]).

Для кислорода ( $O_2$ ):  $\Theta_{O_2} = 2239,1$  К ;  $\xi_{O_2} = 0,209$ ;

$$f_{mv, O_2} = (P/1014) \left\{ 24 + 4,41 \cdot 10^4 h \cdot (0,05 + h) / (0,391 + h) \right\}, \text{ Гц,}$$



где  $h = e/P100$  – молярная концентрация водяного пара в %;  $e$  – парциальное давление водяного пара в гПа,  $P$  – атмосферное давление в гПа.

Для азота ( $N_2$ ):  $\Theta_{N_2} = 3352 \text{ К}$ ;  $\xi_{N_2} = 0,781$ ;

$$f_{mv, N_2} = (P/1014) \left\{ 9 + 6,73 \cdot 10^3 h \exp(-25,3T^{-1/3}) \right\}, \text{ Гц.}$$

Для паров воды ( $H_2O$ ):  $2\pi\xi_i/35 = \pi h/2400$ ;  $\Theta_{H_2O} \approx \Theta_{O_2}$ ;  $f_{mv, H_2O} \approx f_{mv, O_2}$ .

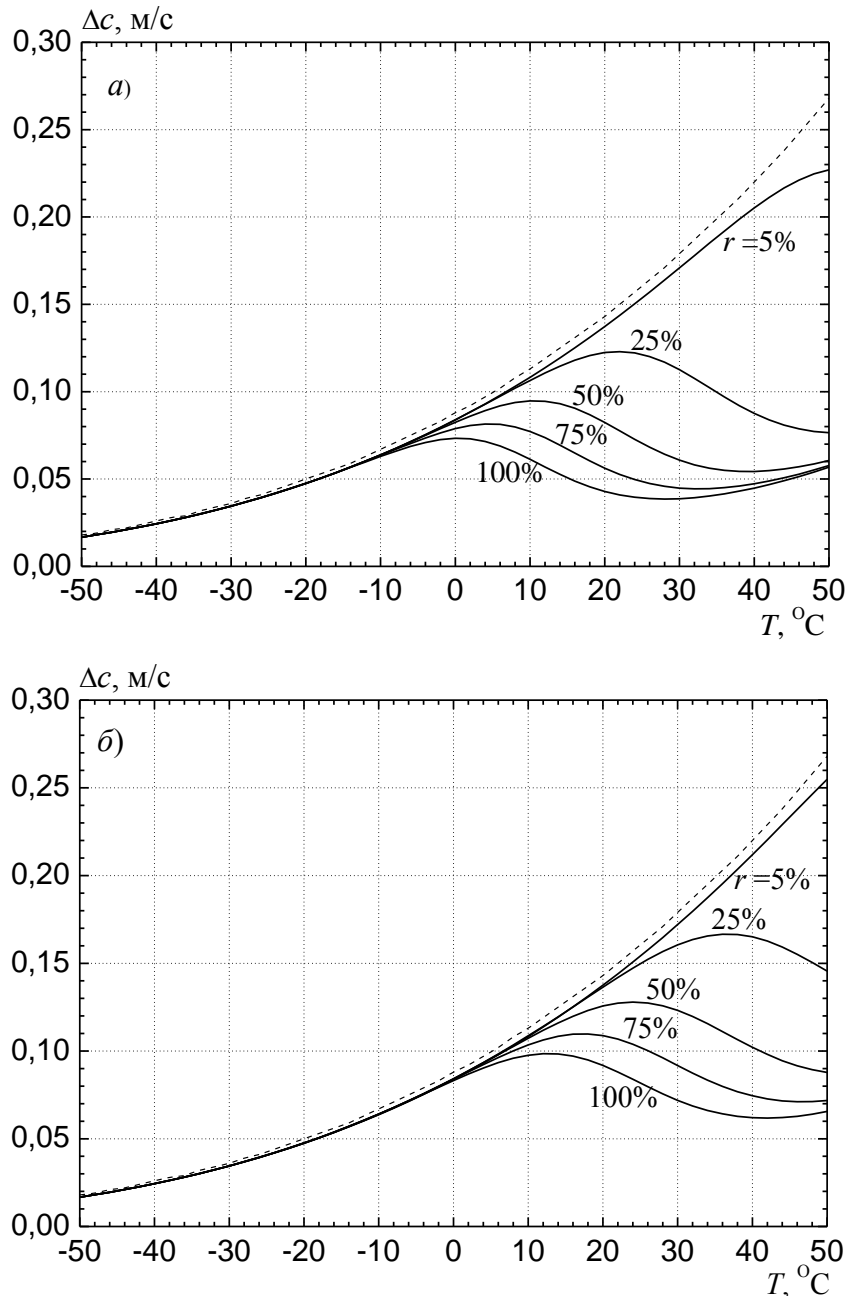


Рисунок 1. Дисперсионные изменения скорости звука  $\Delta c$  в воздухе на двух ультразвуковых частотах  $f$  в зависимости от температуры  $T$  при различных значениях относительной влажности воздуха  $r$ : сплошные линии – функции  $\Delta c(f, T)$ , штриховая – функция  $\Delta c_\infty(T)$ ; а)  $f = 40 \text{ кГц}$ ; б)  $f = 100 \text{ кГц}$ .

Нами было выполнено множество расчетов по приведенным выше формулам. В них было выявлено, что для звука частоты  $f = 1$  кГц и выше кислород приводит к примерно на два порядка большему коэффициенту поглощения  $\alpha_v$ , чем азот, а коэффициенты поглощения звука за счет колебательной релаксации азота в свою очередь существенно больше, чем для паров воды. При этом для азота релаксационная частота  $f_{mv}$ , обычно не превышает 1 кГц, а для кислорода и паров воды она может достигать десятки и сотни килогерц. Вклады в дисперсию звука колебательной релаксации кислорода и азота сравнимы по порядку величины, в то время как влиянием колебательной релаксации водяного пара практически всегда можно пренебрегать. Последнее не означает, что при оценивании дисперсии звука можно игнорировать наличие водяного пара в атмосфере, поскольку от его молярной концентрации  $h$  существенно зависят релаксационные частоты  $f_{mv, O_2}$  и  $f_{mv, N_2}$ . С учетом изложенного для инженерных расчетов ожидаемой дисперсии звука в атмосфере нами предлагается упрощенный алгоритм в виде:

$$\Delta c \approx 1,202 \cdot 10^6 T^{-3/2} \left\{ \frac{1}{f_{mv, O_2}^2 + f^2} \exp\left(-\frac{2239}{T}\right) + \frac{8,375}{f_{mv, N_2}^2 + f^2} \exp\left(-\frac{3352}{T}\right) \right\} f^2, \text{ м/с}, \quad (7)$$

где величина  $T$  должна подставляться в  $^{\circ}\text{K}$ , а  $f, f_{mv, O_2}$  и  $f_{mv, N_2}$  – в Гц.

Формула (7) позволяет рассчитывать значения  $\Delta c$  для звука в нижней атмосфере с частотой до 200 кГц, отличающиеся от вычисляемых из (6) не более, чем на величины порядка  $10^{-4} - 10^{-5}$  м/с. На рис. 1 приведены результаты расчета по ней величин  $\Delta c$  для двух ультразвуковых частот 40 и 100 кГц, часто используемых в УАТ. Не трудно заметить сильную зависимость  $\Delta c$  от частоты звука  $f$  и значений метеорологических параметров – температуры и влажности воздуха. Вычисленные для ультразвуковых частот значения  $\Delta c$  при положительных температурах часто превышают 0,1 м/с, что указывает на необходимость их учета при обработке данных измерений УАТ.

Настоящая работа выполнена по государственному заданию ИМКЭС СО РАН.

1. International standard: ISO 16622:2002. Meteorology – Sonic anemometers/thermometers – Acceptance test methods for means wind measurements.
2. Дуккерт П.О. Распространение волн взрывов в атмосфере. Л.: Гостехтеоретиздат, 1934. 128 с.
3. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 197 с.
4. Богушевич А.Я. Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 2. С. 170–175.
5. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука, 1984. 399 с.
6. Виноградова М.Б., Руденко О.В., Сухоруков А.П.. Теория волн. М.: Наука, 1990. 432 с.
7. Pursuit D.R. Air absorption calculations for outdoor plant // J. Sound and Vibration. 1979. V.61. N3. P.427-436.
8. ANSI S1. 26-1978 (ASA 23-1978). American national standart: Method for the calculation of the absorption of sound by atmosphere/N.Y.: Amer. Inst. Of Phys. For Acoust. Soc. Amer. 1978. 30 p.
9. Bass H.E.. Absorption of sound in air: high temperature predictions // J. Acoust. Soc. Amer..1981. V.69. N 1. P.124-138.
10. Marlow P.G., Street P.R. Sound absorption in mixtures of oxygen and water vapor in the temperature range 298-410 K // J. Acoust. Soc. Amer..1974. V.56. N 3. P.873-877.

## РАСЧЕТ ЭМИССИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБЛАЧНЫХ ИНФОРМАЦИОННО- ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ

*Ботыгин И.А.<sup>1</sup>, Тартаковский В.А.<sup>1</sup>, Шерстнёв В.С.<sup>2</sup>, Шерстнёва А.И.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
bia@tpu.ru, trtk@list.ru

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, vss@tpu.ru, sherstneva@tpu.ru

В настоящее время очень широко обсуждаются различные инициативы по снижению воздействия на климат. Не вдаваясь в дискуссии, отметим, что «борьба с изменением климата» является одной из 17-ти целей устойчивого развития государства, которые Президент России В.В. Путин озвучил в своём обращении к Федеральному собранию в апреле 2021 года [1]. Инициатива главы государства в русле международной концепции экологического, социального и корпоративного управления (Environmental, Social and Governance, ESG), одной из главных задач которой является принятие мер по сокращению воздействия на природу. Среди этих мер рассмотрим один из частных аспектов экологического критерия, связанного с негативным воздействием на природу. А именно, оценку углеродного следа, на первый взгляд, далёких от экологически вредных производств и тем более непосредственно не выбрасывающих углекислый газ – центров обработки данных.

Представить сегодня нашу жизнь без сервисов глобальной телекоммуникационной сети Интернет уже невозможно. Электронная почта, социальные сети, потоковое видео, хранилища данных и базы знаний, всевозможные облачные службы и многое-многое другое используются, практически, ежедневно. С технической точки зрения – это десятки миллионов серверов и систем охлаждения, сетевое оборудование (маршрутизаторы, коммутаторы, мосты и пр.) для подключения серверов друг к другу и к Интернету, твердотельные накопители для хранения данных и другая всевозможная вспомогательная аппаратура. Для функционирования всем устройствам необходимо электричество. По оценкам Международного энергетического агентства (International Energy Agency, IEA) [2], расчетное глобальное потребление электроэнергии центрами обработки данных в 2022 году составило 240÷340 ТВтч (1%÷1,3% мирового потребления электроэнергии). Электроэнергия, используемая для майнинга криптовалюты, – это дополнительно 0,4% годового мирового спроса на электроэнергию. С учётом того, что основным источником электроэнергии является ископаемое топливо (80%), а инфраструктура глобальных телекоммуникаций непрерывно расширяется (необходимо адаптироваться к росту цифровых транзакций), экологические проблемы с течением времени только возрастают.

Экологический вред значительного потребления электроэнергии центрами обработки данных (ЦОД) связывают, в основном, с эквивалентным выбросом двуокиси углерода (CO<sub>2</sub>). Не все центры обработки данных используют электричество, полученное от сжигания угля, газа, нефти или нефтепродуктов. Поэтому не весь объём углекислого газа, выбрасываемый электростанциями на ископаемом топливе, примерно 1 кг CO<sub>2</sub> на 1 кВт·ч [3], соотносится с ЦОД. Но даже в этих условиях, эффективное использование электроэнергии, поиск и разработка новых методов снижения общего энергопотребления, оптимизация инфраструктуры ЦОД и вычислений, являются важными направлениями деятельности центров обработки данных в отношении экологической устойчивости и минимизации воздействия на окружающую среду.

Для оценки выброса эквивалентного CO<sub>2</sub> при выполнении информационно-вычислительных задач существует ряд программных средств. Например, CodeCarbon – откры-

тая библиотека на Python для оценки количества эквивалентного углекислого газа, выбрасываемого облачными или персональными вычислительными ресурсами при выполнении кода [4]. Ещё один проект с открытым исходным кодом для измерения и мониторинга выбросов эквивалентного углекислого газа в облаке – Cloud Carbon Footprint [5]. Инструментарий проекта использует методики, позволяющие не только конвертировать использование облака в расчетные показатели энергопотребления и выброса углекислого газа, но и получить метрики и оценки экономии CO<sub>2</sub>. В работе [6] представлен инструмент для отслеживания и прогнозирования энергетического и углеродного следа глубоких нейронных сетей – Carbontracker. Авторы отмечают, что машинное обучение (ML) может стать существенным фактором, влияющим на изменение окружающей среды, если экспоненциальная тенденция его использования сохранится. Специалисты в области ML должны уметь оценивать свое энергопотребление и углеродный след. Только в этом случае они смогут активно предпринимать шаги по его уменьшению. Активные дискуссии по криптовалюте и воздействие технологии её получения на окружающую среду подтолкнули некоммерческую организацию Solana Foundation выпустить инструмент для отслеживания углеродного следа от блокчейна [7].

В настоящей работе для отслеживания энергопотребления и эквивалентных выбросов CO<sub>2</sub> модельных вычислений использовался пакет с открытым исходным кодом – Eco2AI [8]. Моделирование рабочей нагрузки осуществлялось на классической модели машинного обучения – линейной регрессии с тестовым набором данных, в котором выполнялось условие зависимости целевой переменной от набора связанных признаков. То есть, в тестовом наборе данных, наряду с характеристиками связанных признаков, были и значения целевой переменной, которые считались «достоверными». Задача контролируемого машинного обучения заключалась в том, чтобы подобрать параметры нейросети так, чтобы ошибка определения «достоверных» значений целевой переменной была минимальной на тестовом наборе данных.

Для имитации алгоритмической сложности модельных вычислений была выбрана архитектура глубокой нейронной сети (рис. 1).

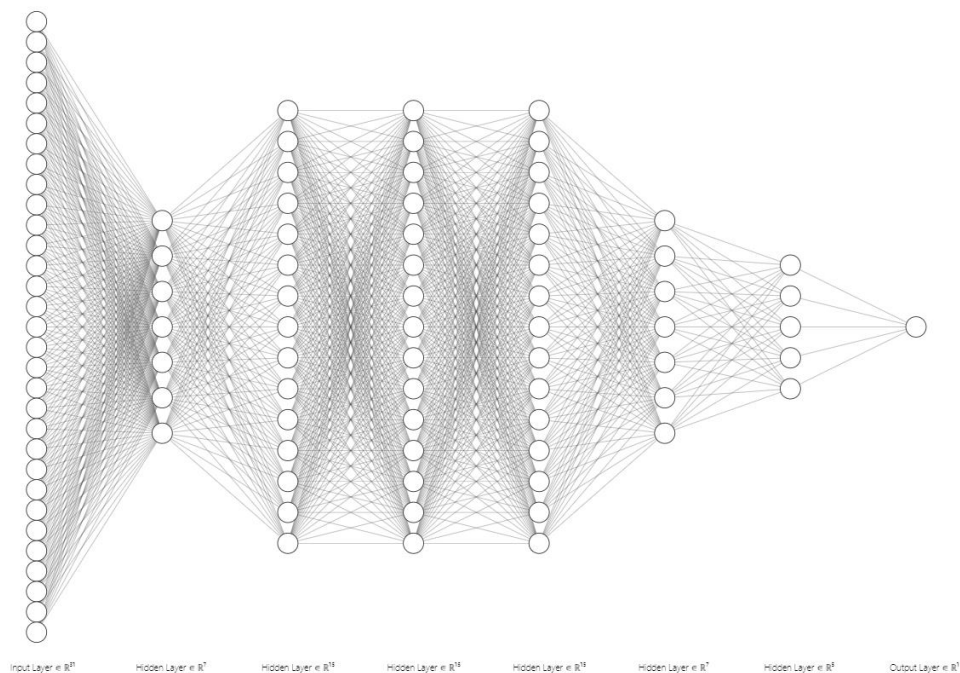


Рисунок 1. Архитектура нейронной сети.

Расчёт эквивалентного выброса двуоксида углерода в процессе обучения модели осуществлялся по формуле:

$$CO_2 = (E_{CPU} + E_{GPU}) * CO_{2coef}, \text{ где:}$$

$E_{CPU}$  – энергия, затраченная центральным процессорным устройством (CPU),

$E_{GPU}$  – энергия, затраченная графическим процессором (GPU),

$CO_{2coef}$  – региональный коэффициент эмиссии углекислого газа.

Ниже приведены некоторые отчёты по условному энергопотреблению и сопутствующим выбросом углекислого газа, полученные в экспериментах на различных конфигурациях информационно-вычислительных платформ.

На рис. 2 приведён отчёт о процессе обучения на CPU в Google Colab.

id	project_name	experiment_description	epoch	start_time	duration(s)	power_consumption(kWh)	CO2_emissions(kg)	CPU_name	GPU_name	OS	region/country	cost
972d88f9-6a8d-4e7b-95c1-8356f81fc79b	YourProjectName	training the <your model> model		2022-12-26 07:34:29	0.5138208866119385	7.2209836010491325e-09	2.845912393894681e-09	Intel(R) Xeon(R) CPU @ 2.20GHz/1 device(s), TDP:300.0	0 device(s)	Linux	NL/Groningen	
6722e4d1-999f-4b33-ae49-7d4aa635da7b	YourProjectName	training the <your model> model	N/A	2022-12-26 07:40:15	52.18266725540161	0.0024207309174457733	0.0009540512069909759	Intel(R) Xeon(R) CPU @ 2.20GHz/1 device(s), TDP:300.0	0 device(s)	Linux	NL/Groningen	nan

Рисунок 2. Отчет о процессе обучения на CPU в Google Colab.

На рис. 3 приведён отчёт о процессе обучения на GPU в Google Colab.

id	project_name	experiment_description	epoch	start_time	duration(s)	power_consumption(kWh)	CO2_emissions(kg)	CPU_name	GPU_name	OS	region/country	cost
8d0c8b05-0d16-47c9-9c3c-713fc9dbcb8a8	YourProjectName	training the <your model> model	N/A	2022-12-26 09:12:57	61.29363560676575	0.0034906772591557283	0.0017057822748771114	Intel(R) Xeon(R) CPU @ 2.00GHz/1 device(s), TDP:300.0	Tesla T4 1 device(s)	Linux	SG/Singapore	nan

Рисунок 3. Отчет о процессе обучения на GPU в Google Colab.

На рис. 4 приведён отчёт о процессе обучения на CPU в Yandex Cloud.

	id	project_name	experiment_description	epoch	start_time		
1	d6938fdb-9a82-4a9e-88f7-9049f0c1034d	YourProjectName	training the <your model> model	N/A	2022-12-26 09:36:38		
duration(s)	power_consumption(kWh)	CO2_emissions(kg)	CPU_name	GPU_name	OS	region/country	cost
21.808870315551758	0.0008210942677572462	0.00019752243705168314	ke/1 device(s), TDP:300.0	0 device(s)	Linux	RU/Moscow	nan

Рисунок 4. Отчет о процессе обучения на CPU в Yandex Cloud.

На рис. 5 приведён отчёт о процессе обучения на CPU в VK Cloud.

	id	project_name	experiment_description	epoch	start_time	duration(s)
1	015114eb-34ef-4a3b-...	YourProjectName	training the <your mo...	N/A	2022-12-26 15:56:01	42.14982771873474
power_consumption(k...	CO2_emissions(kg)	CPU_name	GPU_name	OS	region/country	cost
0.0009226487380781...	0.0002219523804320...	Intel Xeon Processor ...	0 device(s)	Linux	RU/Moscow	nan

Рисунок 5. Отчет о процессе обучения на CPU в VK Cloud.

Ниже представлена финальная таблица для сравнения результатов. Сформированы только параметры времени выполнения, энергопотребления и значения эмиссии CO<sub>2</sub> (Таблица 1).

**Таблица 1. Итог по энергопотреблению и эмиссии.**

Наименование	Время (сек)	Энергопотребление (кВт)	Эмиссия CO <sub>2</sub> (кг)
Google Colab (2 CPU)	52.18	0.002427	0.00095
Google Colab (GPU, CPU)	61.29	0.003491	0.00171
Yandex Cloud (4 CPU)	21.81	0.000821	0.00021
Yandex Cloud (GPU, CPU)	36.91	0.001019	0.00026
VK Cloud (4 CPU)	42.15	0.000923	0.00022

Как видно из таблицы, и на GPU, и на CPU наибольшим энергопотреблением и, как следствие, эмиссией CO<sub>2</sub> обладает Google Colab. Стоит сказать, что значения, полученные для обучения на Yandex Cloud с использованием GPU, скорее всего, принадлежат CPU, поскольку энергопотребление практически не изменилось. Значения эмиссии, полученные в YandexCloud и VKCloud, примерно, равны.

В ближайшее десятилетие спрос на информационные системы с использованием искусственных нейросетей будет только возрастать. Поэтому, чтобы избежать потенциально резкого роста энергопотребления и связанного с этим климатических последствий, необходимо развивать технологии вычислений, технологии низкоэнергетического хранения больших данных, инновационные технологии отвода тепла центров обработки данных. И, безусловно, использовать источники возобновляемой энергии для минимизации воздействия на окружающую среду.

1. Актуальность инициативы // russia-esg.ru. URL: <https://russia-esg.ru/?ysclid=1kmfndntemh289640653> (дата обращения: 12.07.2023).

2. Data Centres and Data Transmission Networks // iea.org. URL: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks> (дата обращения: 12.07.2023).

3. Методика расчета выбросов парниковых газов (CO<sub>2</sub>-эквивалента) // Межрегиональный альянс энергоаудиторов. [2012-2023]. URL: <https://sro150.ru/index.php/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovyykh-gazov> (дата обращения: 12.07.2023).

4. Track and reduce CO<sub>2</sub> emissions from your computing // Code Carbon. [2021]. URL: <https://codecarbon.io/> (access date: 15.07.2023).

5. Cloud Carbon Emissions Measurement and Analysis Tool // cloudcarbonfootprint.org. URL: <https://www.cloudcarbonfootprint.org/> (access date: 15.07.2023).

6. Anthony L.F.W., Kanding B. and Selvan R. Carbontracker: Tracking and Predicting the Carbon Footprint of Training Deep Learning Models // arXiv: 2007.03051. URL: <https://arxiv.org/abs/2007.03051> (access date: 15.07.2023).

7. Solana запустила трекер углеродного следа от блокчейна // TradingView, Inc. [2023]. URL: <https://ru.tradingview.com/news/forklog:621442c9867b8:0/> (дата обращения: 12.07.2023).

8. Budennyu S., Lazarev V., Zakharenko N., et al. Eco2AI: carbon emissions tracking of machine learning models as the first step towards sustainable AI// arXiv: 2208.00406. URL: <https://arxiv.org/abs/2208.00406> (access date: 15.07.2023).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ МНОГОЭЛЕМЕНТНОГО ПИРАНОМЕТРА

*Зуев С.В.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
zuev@imces.

Почти всю энергию (более 99,5 %) Земля получает от Солнца. В свою очередь 99% этой энергии лежит в коротковолновом диапазоне волн от 0,3 до 4 мкм. Именно поэтому большое значение имеет непрерывный мониторинг основных элементов приходящей солнечной радиации – прямой  $S$ , рассеянной  $D$  и суммарной  $Q$ . Полный комплект приборов для их измерения включает в себя актинометр, затененный и незатененный пиранометры, устройство слежения за Солнцем и регистратор данных. Российский рынок актинометрических приборов характеризуется полной зависимостью от зарубежных производителей таких, как Vaisala (Финляндия), Kipp & Zonen (Голландия), Пеленг (Беларусь) и др., Автоматизированные актинометрические комплексы на базе таких приборов имеют не только значительную массу и габариты, но и высокую стоимость. Кроме того, эксплуатация актинометрических комплексов требует наличия определенной инфраструктуры, что сильно ограничивает их широкое применение. Поэтому в большинстве случаев потребители ограничиваются непрерывным мониторингом только суммарной радиации с помощью одного незатененного пиранометра.

В ИМКЭС СО РАН разработаны теоретические основы работы многоэлементного ориентированного пиранометра для измерения прямой, рассеянной и суммарной радиации [1]. Такой пиранометр не имеет каких-либо подвижных частей и заменяет собой три стандартных актинометрических прибора (актинометр и два пиранометра) и устройство слежения за Солнцем. Опытный образец пиранометра был разработан и изготовлен ООО "СибМетеоПрибор" при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям, его внешний вид показан на рисунке 1.



Рисунок 1. Внешний вид многоэлементного ориентированного пиранометра.

Конструктивно прибор представляет собой металлический цилиндр диаметром 115 и высотой 90 мм, в верхней части которого под защитным колпаком расположены семь датчиков и теневой экран специальной формы, благодаря которому в любой момент времени при любом положении Солнца как минимум один датчик полностью открыт для Солнца и измеряет максимальную величину солнечной радиации  $Q_{max}$  и как минимум один датчик полностью закрыт от Солнца и измеряет минимальную величину солнечной радиации  $Q_{min}$ . Верхняя граница лепестков теневого экрана соответствуют суточному ходу Солнца в дни летнего солнцестояния для данной широты местности  $+5^\circ$ . Измеренные максимальные и минимальные значения солнечной радиации можно описать следующим образом

$$\begin{cases} Q_{max} = S' + D - \Delta D; \\ Q_{min} = D - \Delta D, \end{cases} \quad (1)$$

где  $S'$  – прямая радиация на горизонтальную поверхность;  $\Delta D$  – часть рассеянной радиации, не поступающей от закрытых теневым экраном участков небосвода.

Определив значения  $Q_{max}$  и  $Q_{min}$  рассеянную, суммарную и прямую радиацию можно рассчитать как

$$\begin{cases} D = \frac{n}{n-1} \cdot Q_{min}; \\ Q = Q_{max} + \frac{1}{n-1} \cdot Q_{min}; \\ S = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{\sin h}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $n = 3,95$  – отношение всей площади обзораемой полусферы небосвода к площади теневого экрана;  $h$  – высота Солнца над горизонтом.

Основные характеристики пиранометра:

- измеряемая солнечная радиация – суммарная, рассеянная и прямая;
- спектральный диапазон 0,36-2,3 мкм;
- диапазон измерений 10-1500 Вт/м<sup>2</sup>;
- инерционность выходного сигнала не более 10 с;
- погрешность (инструментальная) не более 5%;
- каналов измерения – 7;
- количество хранимых значений - не менее 100000 на канал;
- длина последовательного канала связи RS-232 не менее 25 м;
- класс пылевлагозащиты не ниже IP65;
- питание от внешнего источника 5 В или от встроенного литий-тионилхлоридного элемента 3,6 В 2,3 А·ч.

Основной целью опытной эксплуатации пиранометра была проверка возможности использования датчиков теплового потока на основе гипербатареи медь-константановых термопар в качестве актинометрических, проверка работы электронной части пиранометра и проверка герметичности всей конструкции пиранометра. Для этого опытный образец пиранометра был установлен на метообсерватории ИМКЭС СО РАН в непосредственной близости от пиранометра CM11 (Kipp & Zonen), который использовался в качестве эталонного (рисунок 2).

В результате опытной эксплуатации пиранометра в течение мая-июня 2023 года был сделан вывод о принципиальной возможности использования выбранных датчиков для измерения солнечной радиации, т.к. у них отсутствует эффект накопления тепла при длительном нахождении на открытом Солнце. Электронная часть пиранометра работала в заданных режимах, герметичность конструкции была не нарушена.



Результаты опытной эксплуатации показали, что средняя ошибка измерений суммарной радиации опытным образцом пиранометра не превысила 7% относительно эталонных измерений при высотах Солнца  $h > 20^\circ$ . Для измерений при более низких высотах Солнца необходима доработка конструкции измерительной части пиранометра. На рисунке 3 приведен пример суточного хода суммарной радиации измеренной опытным образцом пиранометра (красная линия) и образцовым пиранометром СМ11 (синяя линия).

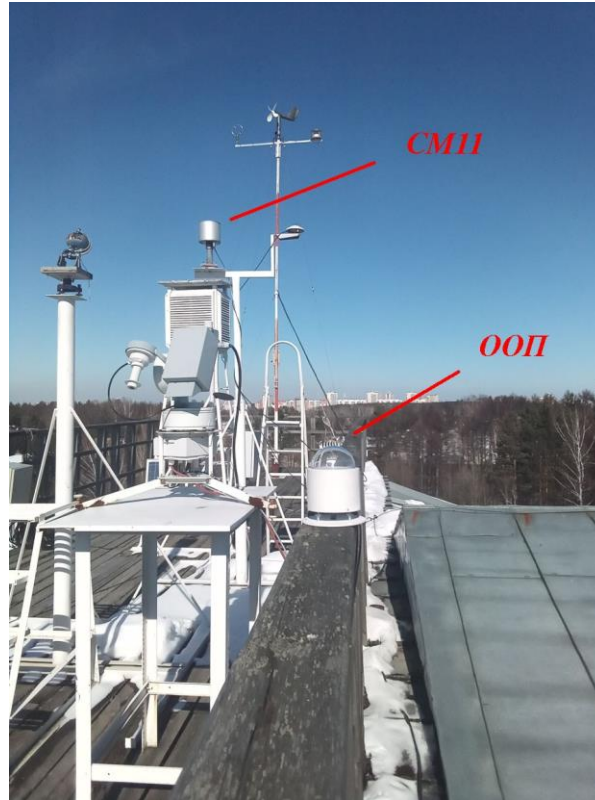


Рисунок 2. Опытный образец пиранометра (ООП) и образцовый пиранометр СМ11 на метеобсерватории ИМКЭС СО РАН.

Ввиду отсутствия приборов для измерения прямой и рассеянной радиации сравнение результатов их измерений проводилось по методике [2, 3], позволяющей при кучевой облачности по временному ряду суммарной радиации  $Q$  с точностью до 10% определять прямую радиацию на горизонтальную поверхность  $S'$  и рассеянную радиацию  $D$ . Для примера, в результате анализа приведенного на рисунке 4 образцового ряда было получено 8 пар сличения суммарной радиации при открытом Солнце, когда  $Q=S'+D$  (красные точки), и при закрытом Солнце, когда  $Q = D$  (синевые точки), по которым прямая радиация  $S'$  определялась как разница между ними. Относительные погрешности расхождения полученных результатов измерения прямой и рассеянной радиации при высотах Солнца  $h > 20^\circ$  за весь период опытной эксплуатации не превысили 15% для  $S'$  и 20 % для  $D$ .

Результаты опытной эксплуатации многоэлементного пиранометра показали, что количество датчиков можно сократить с 7-ми до 5-6-ти без каких-либо функциональных потерь, для чего потребуются разработка новой оптимальной формы теневого экрана путем 3D моделирования. Кроме того, необходима доработка измерительной части пиранометра в части установки на датчики косинусных корректоров для измерений радиации при низких углах высоты Солнца.

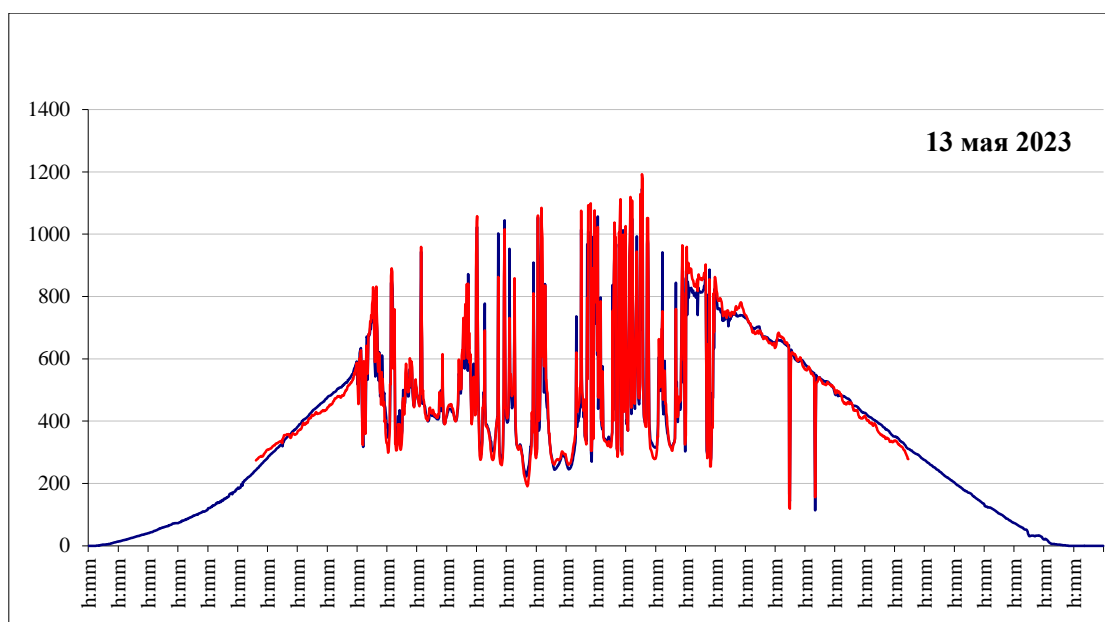


Рисунок 3. Суточный ход суммарной радиации.

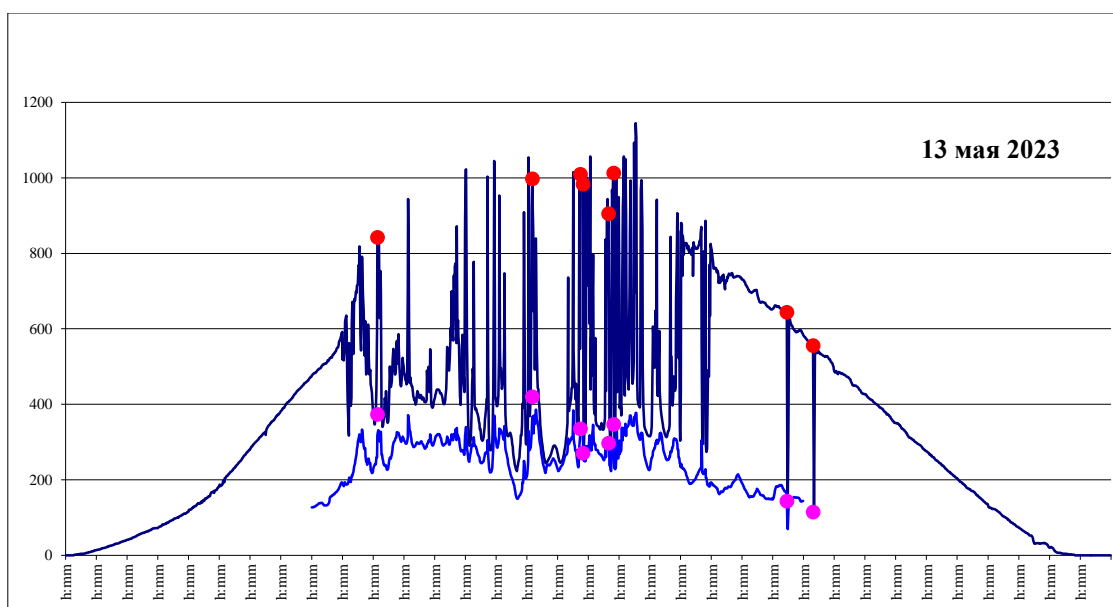


Рисунок 4. Сравнение прямой и рассеянной радиации.

Теоретические исследования способа измерения прямой, рассеянной и суммарной радиации многоэлементным ориентированным пиранометром выполнены при финансовой поддержке РАН в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (проект № 121031300155-8); разработка и изготовление опытного образца многоэлементного пиранометра выполнены при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (грант № 74026).

1. Патент РФ 2682590. Способ измерения характеристик солнечного излучения. Опубликовано: 19.03.2019, Бюл. № 8.
2. Патент РФ 2727328. Способ определения рассеянной и прямой радиации при кучевой облачности. Опубликовано: 21.07.2020, Бюл. № 21.
3. Zuev S.V. Determination of diffuse and direct irradiance under  $Cu$  using pyranometer data // Proc. SPIE. – 2022. – V. 12341. – P. 1234107. DOI: 10.1117/12.2643766.

## ТИПОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ БОЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЛИДАРНОЙ СЪЁМКИ

*Ильясов Д.В., Каверин А.А., Ниязова А.В., Жернов С.Н.*

<sup>1</sup>Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, d\_ilyasov@ugrasu.ru

Болота – важный компонент бюджета углерода планеты: занимая лишь 3.5 – 5% поверхности суши, они запасают в виде торфа более 500 ГтС [1], являются одним из крупнейших естественных источников метана в атмосферу [2, 3] и растворенного органического углерода с поверхностным и внутрипочвенным стоком [4]. Болота способны к непрерывному накоплению и последующему консервированию CO<sub>2</sub> атмосферы в течение тысячелетий [5], что, однако, в значительной степени зависит от текущих климатических условий. Понимание особенностей функционирования болот как компонентов бюджета углерода крайне актуально в контексте современных климатических изменений и поиска путей адаптации к ним [6].

Запасы углерода, интенсивность ассимиляции атмосферного CO<sub>2</sub> и эмиссии CH<sub>4</sub> в значительной степени обусловлены специфическими гидрологическими условиями и локальными характеристиками растительного и почвенного покрова болот, которые весьма гетерогенны в пространстве и во времени. Шаг пространственной гетерогенности болот очень мал – свойства растительного покрова и почвенные условия могут изменяться на уровне метров; а амплитуда – напротив, чрезвычайно высока и может достигать нескольких порядков. Это вносит существенные неопределенности в оценку углеродного баланса модельных болот (на уровне которых обычно и производятся исследования запасов и потоков углерода), поэтому полученные полевые данные (часто ограниченные по пространственному охвату или вовсе – точечные) необходимо адекватно интерпретировать в пространственном аспекте. Такая интерпретация может быть осуществлена на основе дистанционных данных, полученных при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), осуществляющих съемку в видимом, мультиспектральном, лидарном и других диапазонах с пространственным разрешением, превышающим шаг пространственной гетерогенности болот.

Процесс использования БПЛА для учета пространственной изменчивости болот может быть условно разделен на несколько этапов: i) сбор данных – собственно съемка ii) первичная обработка – получение промежуточного результата (ортофотоплан местности, типологическая карта и др.) iii) анализ данных (расчет запасов или потоков углерода, оценка полученных неопределенностей).

Цель текущей работы состояла в создании типологической карты олиготрофного болота, основанной на данных лидарной БПЛА – съемки на примере Мухринского болотного массива.

Съемка была осуществлена при помощи БПЛА Matrice 300 и лидара Zenmuse L1 16 – 20 мая 2023 года на участке Мухринского болотного массива размером 2×2 км. Плотность точек при измерении лазерным дальномером составила 100 – 150 точек/м<sup>2</sup>, высота съемки – 110 м. Ключевыми характеристиками, на основе которых была выполнена типологическая классификация местности, стали: нанорельеф местности (дешифрирование гряд и мочажин) и высота древесного покрова. Для выделения гряд и мочажин полученное в процессе съемки облако точек было загружено в программе DJI Terra до 25 – 40 точек/м<sup>2</sup> и сохранено в формате .las. Далее в программе Agisoft Metashape при помощи инструмента «Обработка – построить ЦММ» на основе загруженного облака точек была построена цифровая модель местности (ЦММ) в формате .tiff (6 см/пикс), где значение каждого пиксела соответствовало высоте над уровнем моря. Критерием выде-

ления гряд и мочажин стало стандартное отклонение значений пикселей ЦММ в векторной ячейке размером  $5 \times 5$  м, которые было рассчитано при помощи инструмента «Зональная статистика растра» в программе QGIS. Мочажины – это плоские поверхности, с малыми колебаниями уровней высот («гладкие»), гряды – это пересеченные поверхности с большими колебаниями уровней высот из-за наличия древесной и/или кустарничковой растительности, а также кочек («шероховатые»; здесь и далее под грядами мы понимаем любые участки, занятые древесной растительностью на болотах). Порог стандартного отклонения между «гладкими» и «шероховатыми» поверхностями был установлен экспертным путем на основе эталонных участков гряд и мочажин (посещенных на местности) и составил 0.15. Достаточно крупный шаг ячейки векторного слоя ячеек (5 м) был выбран на основании степени разреженности древесного и кустарничкового покрова гряд и наличия кочек таким образом, чтобы хотя бы одно дерево, кустарничек, и (или) кочка верифицировали векторную ячейку как гряд. Затем все ячейки, верифицированные как гряды и мочажины, были отнесены к соответствующим классам и сохранены в отдельном векторном формате (рис. 1).

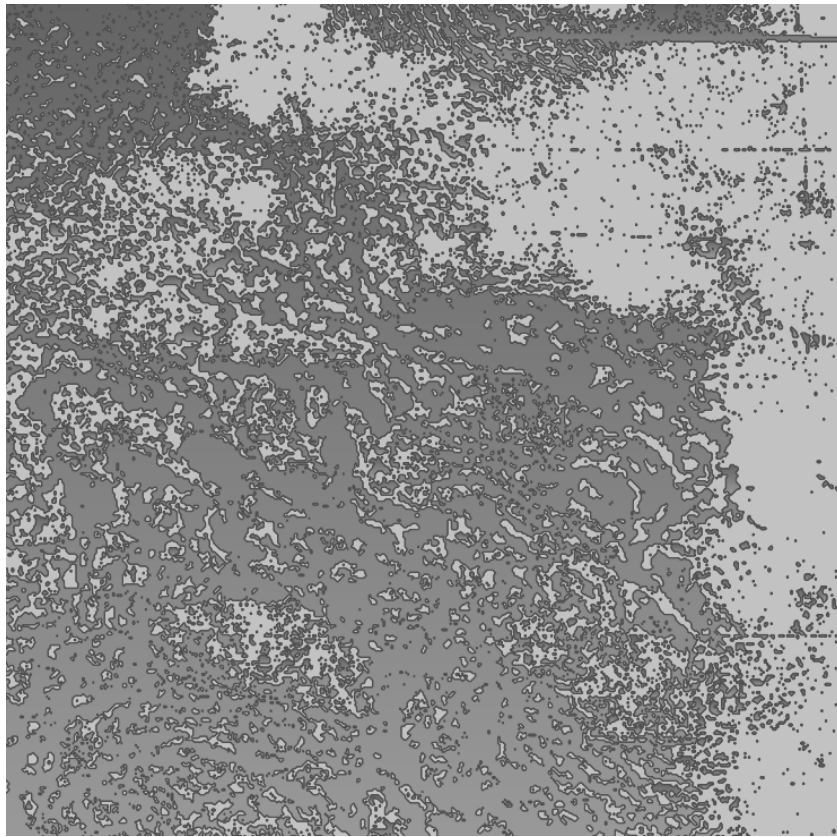


Рисунок 1. Векторный слой гряд и мочажин на участке Мухринского болотного массива (сторона сектора 2 км, направление на север).

Высота деревьев была определена для векторного слоя гряд. Для этого исходная ЦММ была отсечена по векторному слою гряд, и в границах полученной векторной сетки  $5 \times 5$  метров были найдены минимальные высоты, наблюдаемые на грядах при помощи инструмента «зональная статистика растра». Эти высоты были приняты как поверхность почвы гряд и присвоены значениям ячеек слоя векторной сетки. На основе полученного векторного слоя был создан новый растровый слой ЦММground, «лишенный» древесного покрова в границах гряд. Далее был создан слой-маска, соответствующий местоположению, занимаемому деревьями: для этого в слое GRVI (подробное описание методики создания слоя-маски GRVI – см. здесь же, в: Каверин А.А. и др., Типологическая

классификация болотных ландшафтов на основе данных мультиспектральной съёмки) были отсечены все пиксели, в которых  $GRVI \leq 0.20$  (без деревьев). По этому слою-маске был отсечен исходный слой ЦММ: итоговый слой содержал только высоты деревьев, т.е. пиксели, соответствующие участкам, лишенным древесной растительности получили значение «0». Из этого слоя при помощи векторной сетки с шагом  $5 \times 5$  были извлечены максимальные значения пикселей (наивысшие точки крон деревьев) и создан растровый слой ЦММtree. Разность между ЦММtree и ЦММground соответствовала высоте древесной растительности (рис. 2).

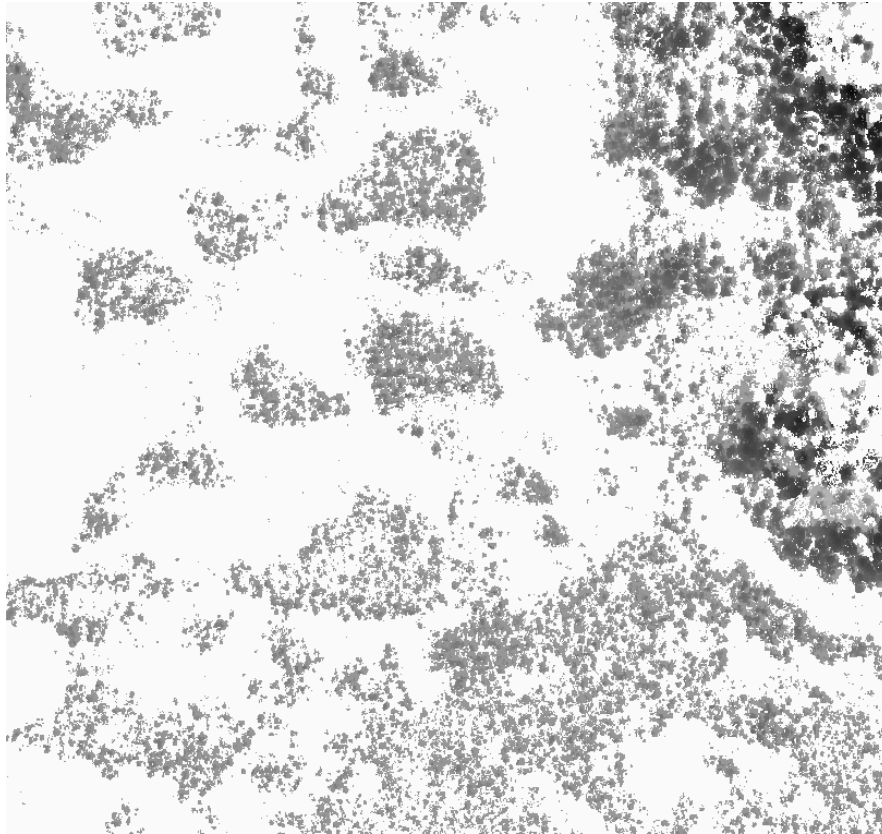


Рисунок 2. Высота древесного покрова на участке Мухринского болотного массива: граница между лесом (справа вверху) и ГМК (сторона сектора 200 м, направление на север).

Участки, характеризующиеся соотношением площади гряд и мочажин 90:10 соответственно (и более, в пользу гряд) были классифицированы как «Рям» (облесенное болото с омбротрофными карликовыми кустарниками и сфагновыми кочками, поросшими соснами; средняя высота деревьев составила 1.1 м);  $>80 - <90$ ;  $>10 - <20$  – как «Рямово-мелко-мочажинный комплекс» (1.0 м);  $80:20$  (и более, в пользу мочажин) – как «Грядово-мочажинный комплекс» (0.9 м). Остальные участки были классифицированы как мочажины. Соотношение гряд и мочажин в целом на исследованном участке олиготрофного болотного массива составило 59:41. Полученные результаты будут в дальнейшем использованы для построения карты запасов углерода в растительном покрове, расчета уровня грунтовых вод, математического моделирования потоков метана и диоксида углерода.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по организации молодежной лаборатории в Югорском государственном университете (НИР 1022031100003-5-1.5.1) в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты».

1. Gorham E. Northern Peatlands: Role in the Carbon Cycle and Probable Responses to Climatic Warming // *Ecological Applications*. 1991. V. 1. No. 2. P. 182–195. <https://doi.org/10.2307/1941811>.
2. Fung I. et al. Three- dimensional model synthesis of the global methane cycle // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1991. V. 96. No. D7. P. 13033–13065.
3. Mitsch W. J. Wetlands and climate change // *National Wetlands Newsletter*. 2016. V. 38. No. 1. P. 5–11.
4. Pastor J., et al. Global warming and the export of dissolved organic carbon from boreal peatlands // *OIKOS*. 2003. V. 100. P. 380–386.
5. Qiu C. The role of northern peatlands in the global carbon cycle for the 21st century // *Global Ecology and Biogeography*. 2020. V. 1. P. 1–18.
6. IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

## ТИПОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ БОЛОТНЫХ ЛАНДШАФТОВ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЁМКИ

Каверин А.А., Ильясов Д.В., Куприянова Ю.В.

Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, A\_Kaverin@ugrasu.ru

Важным инструментом классификации ландшафтов, мониторинга растительности и экосистем являются аэрофотоснимки, собранные с помощью беспилотных летательных аппаратов [2, 6]. Современные технологии продолжают стремительно развиваться, и это приводит к увеличению доступности и использованию легких мультиспектральных датчиков на беспилотных летательных аппаратах. Эти датчики становятся все более популярными в научных кругах, особенно в экологических исследованиях. Они предоставляют уникальную возможность для решения различных научных задач. Однако, несмотря на растущую популярность продуктов, созданных с использованием датчиков БПЛА, в экологии еще не разработаны стандартизированные протоколы и передовые методы для получения крупномасштабного мультиспектрального картографирования с помощью БПЛА.

Мультиспектральные снимки широко используются в дистанционном зондировании со спутников и самолетов и имеют много преимуществ для мониторинга растительности по сравнению с обычными широкополосными снимками в видимом спектре. В том числе в ближней инфракрасной части спектра могут быть рассчитаны определенные индексы растительности, которые позволяют более детально различать по спектру типы растений и стадии развития. Эти индексы могут быть весьма полезны для оценки биологических параметров, таких как продуктивность растительности и индекс площади листьев, а также для целей классификации растительности [1, 7, 9].

Целью данной работы являлось создание типологической карты олиготрофного болота, основанной на данных мультиспектральной БПЛА – съемки на примере Мухринского болотного массива.

Мультиспектральная съемка проводилась с БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral на участке Мухринского болотного массива. Выбранный участок представляет собой полигон размерами 2×2 км. При проведении полевого этапа на территории исследуемого участка выделено 6 основных типов болотных микроландшафтов, характерных для среднетаежной зоны Западной Сибири.:

- сосново-кустарничково-сфагновое болото (типичный рям);
- рямово-мелкомочажинный комплекс (РмМК);
- грядово-мочажинный комплекс (ГМК);
- мочажины в составе РмМК и ГМК, занятые преимущественно пушицей (*Eriophorum vaginatum* L.);
- мочажины в составе РмМК и ГМК, занятые преимущественно шейхцерией (*Scheuchzeria palustris* F.Muell.);
- открытое болото с редкой сосной и пушицевыми кочками.

Мультиспектральная камера DJI Phantom 4 Multispectral встроена в корпус БПЛА. Она позволяет получать изображения в нескольких спектральных диапазонах: зелёном (длина волны 560 нм, полоса пропускания 16 нм), красном (длина волны 650 нм, полоса пропускания 16 нм), синем (длина волны 450 нм, полоса пропускания 16 нм), красном крае (длина волны 730 нм, полоса пропускания 16 нм) и ближнем инфракрасном (длина волны 840 нм, полоса пропускания 26 нм). Точность позиционирования по вертикали:  $\pm 0,1$  м; по горизонтали:  $\pm 0,1$  м [8]. Съемка проводилась 16-20 мая 2023 года, на высоте

100 метров, в одинаковое по освещенности и погодным условиям время. Ключевыми характеристиками, на основе которых была выполнена типологическая классификация местности, стали: нанорельеф местности (дешифрирование гряд и мочажин) и высота древесного покрова. Для выделения мочажин полученные мультиспектральные снимки были обработаны с помощью инструмента «пакетная обработка» в программном комплексе Agisoft Metashape Professional, затем построен мультиспектральный ортофотоплан исследуемого участка. Полученный ортофотоплан был экспортирован в формате .tiff, дальнейшая работа выполнялась в программе QGIS. Мультиспектральный ортофотоплан был «обрезан» по границам мочажин на основе векторного слоя маски, полученного при определении высот из лидарной съемки проводимой параллельно на этот же исследуемый участок (подробное описание проведения лидарной съемки – см. здесь же, в: Ильясов Д.В. и др., Типологическая классификация болотных ландшафтов на основе данных лидарной съёмки). Полученное изображение было классифицировано при помощи метода максимального правдоподобия путем классификации с обучением (эталонные сегменты были заданы в участках проведения наземных ботанических описаний): выделено два класса - «Мочажины II.», «Мочажины III.». Далее полученное изображение было векторизовано и подсчитана площадь, занимаемая каждым классом мочажин относительно площади сегмента.

С помощью мультиспектральной съемки проведена оценка проективного покрытия древесного яруса, включая сухостой. В ходе полевых маршрутов в каждом посещенном сегменте глазомерно оценили проективное покрытие деревьев внутри однородного сегмента со стороной 10 метров (при наличии). Полученные величины проективного покрытия деревьев сопровождалась GPS координатами центра квадратного участка 10×10 метров. Мультиспектральный ортофотоплан был «обрезан» по векторному слою гряд. Далее для этого изображения рассчитали индекс GRVI. Для эталонных участков (10×10 метров) с известным проективным покрытием деревьев подобрали такое пороговое значение индекса GRVI, чтобы оцениваемая площадь проективного покрытия крон совпала с полевыми данными на эталонных участках (порог индекса  $GRVI \geq 0.20$ ). Построили маску с полученным пороговым значением GRVI, данная маска позволила отделить деревья и посчитать их проективное покрытие.

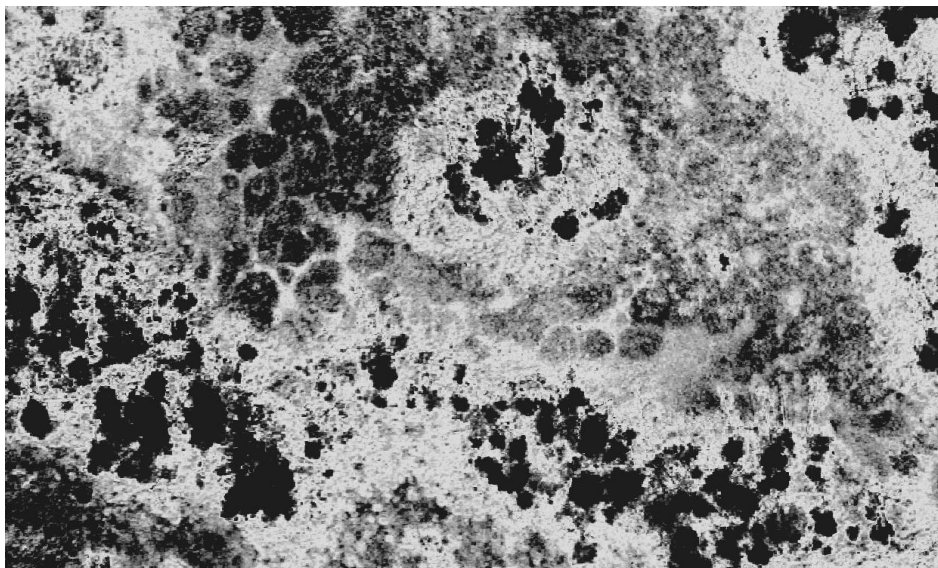


Рисунок 1. Рассчитанный индекс GRVI на участке Мухринского болотного массива (направление на север, черные участки соответствуют грядам, серые мочажинам).



Для оценки проективного покрытия сухостоя был взят обрезанный по векторному слою гряд мультиспектральный ортофотоплан, для него рассчитан индекс NDVI. Для эталонных участков (10×10 метров) с известным проективным покрытием деревьев подобрали такое пороговое значение индекса NDVI, чтобы оцениваемая площадь проективного покрытия сухостоя совпала с полевыми данными на эталонных участках (порог индекса  $NDVI < -0.05$ ). Так же была построена маска по данному порогу индекса для расчета проективного покрытия сухостоя.

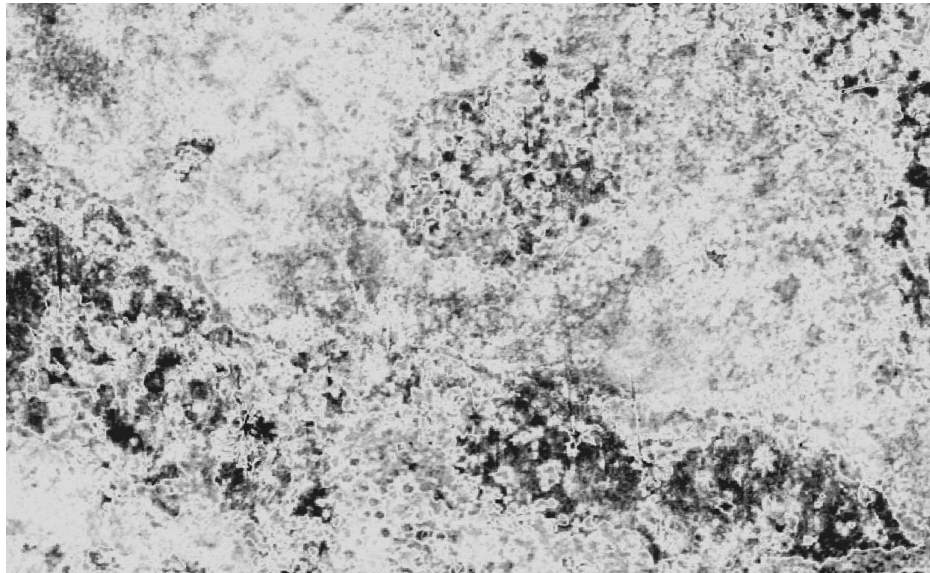


Рисунок 2. Рассчитанный индекс NDVI на участке Мухринского болотного массива (направление на север).

Типологическая классификация болотных ландшафтов проводилась на основе комплекса данных как мультиспектральной, так и лидарной съемки. Из-за высокой гетерогенности растительного покрова болота и высокого пространственного разрешения проведенной съемки отсутствует возможность классификации с обучением и без, на основе спектральных характеристик, поэтому данные методы могут использоваться для классификации болотных ландшафтов. В будущем стоит рассмотреть возможность использования других подходов классификации экосистем мультиспектральной съемки, основанных на применении методов машинного обучения [4], глубокого обучения [3], нейросетей [5].

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по организации молодежной лаборатории в Югорском государственном университете (НИР 1022031100003-5-1.5.1) в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты».

1. Ahmed O. S., Shemrock A., Chabot D. et al. Hierarchical land cover and vegetation classification using multispectral data acquired from an unmanned aerial vehicle // International journal of remote sensing. – 2017. – V. 38. – №. 8-10. – P. 2037-2052.

2. Assmann J. J., Kerby J. T., Cunliffe A. M. et al. Vegetation monitoring using multispectral sensors — best practices and lessons learned from high latitudes // Journal of Unmanned Vehicle Systems. - 2018. - №7. - P. 54-75.

3. Ding R., Luo J., Wang C. et al. Identifying and mapping individual medicinal plant *Lamiophlomis rotata* at high elevations by using unmanned aerial vehicles and deep learning // Plant Methods. – 2023. – V. 19. – №. 1. – P. 38.

4. Ishida T., Kurihara J., Viray F. A. et al. A novel approach for vegetation classification using UAV-based hyperspectral imaging // *Computers and Electronics in Agriculture*. - 2018. - №144. - P. 80-85.
5. Liu T., Sun Y., Wang C. et al. Unmanned aerial vehicle and artificial intelligence revolutionizing efficient and precision sustainable forest management // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 311. – P. 127546.
6. Manfreda S., McCabe M. F., Miller P. E. et al. On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring // *Remote Sens.* - 2018. - №10. - P. 641.
7. Müllerová J., Bartaloš T., Bruna J. et al. Unmanned aircraft in nature conservation: An example from plant invasions // *Remote Sens.* - 2018. - №38. - P. 2177–2198.
8. P4-multispectral // DJI: [Электронный ресурс] // DJI. URL: <https://www.dji.com/ru/p4-multispectral/specs> (дата обращения: 10.09.2023).
9. Samiappan S., Turnage G., Hathcock L.A. and Moorhead R. Mapping of invasive phragmites (common reed) in Gulf of Mexico coastal wetlands using multispectral imagery and small unmanned aerial systems // *Remote Sens.* - 2017. - №38. - P. 2861–2882.

## ОРНИТОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ: ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ

*Красненко Н.П.<sup>1,2</sup>, Власов Е.В.<sup>1</sup>, Кухта А.Е.<sup>1,3</sup>, Раков А.С.<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

<sup>3</sup>ООО «Аэропорт Томск», krasnenko@imces.ru

Под орнитологической безопасностью понимаем как защиту каких-либо объектов и территорий от птиц, так и защиту самих птиц. К сожалению бывают ситуации когда птицы наносят ущерб хозяйственной деятельности людей, каким либо техническим объектам и сооружениям, приводят к гибели людей и гибнут сами.

Остановимся на двух проблемах обеспечения орнитологической безопасности, которые актуальны и требуют практического решения. Первая из них связана с авиационной безопасностью, вторая с высоковольтными линиями электропередачи (ЛЭП). Существуют и применяются разнообразные методы и средства для решения указанных проблем, однако коренных решений нет и в течение десятилетий они постоянно напоминают о себе.

Проблема орнитологического обеспечения безопасности полётов [1-3] занимает в авиации одну из ведущих позиций. Согласно статистическим данным, столкновения самолётов с птицами на территории России и в мире происходят регулярно, на протяжении всего года и являются основным повреждающим фактором самолетов биологического происхождения. Анализ материалов расследований и производственных происшествий показывает, что опасность создаваемая птицами, вносит существенный вклад в общую статистику происшествий. Ежегодно прослеживается тенденция к увеличению случаев столкновений, что обусловлено ростом интенсивности авиаперевозок, снижением шумности двигателей самолетов, привыканием птиц к окружающей обстановке. Основное количество столкновений с птицами происходит на высотах до 300 метров, преимущественно на этапах снижения или набора высоты воздушным судном. Очевидно, что это происходит на территории аэродрома и вблизи от него. Практика в области орнитологического обеспечения безопасности полётов показывает, что при всём богатстве орнитофауны в столкновениях с воздушными судами участвует определённый спектр видов [1], более-менее специфичный для каждого конкретного аэропорта. Сосредоточив усилия на работе с этими видами, можно существенно снизить опасность, создаваемую птицами для воздушных судов. В каждом большом аэропорту существует орнитологическая служба, разрабатываются и реализуются мероприятия по снижению вероятности столкновений воздушных судов с птицами.

Применяются различные типы отпугивателей птиц. К техническим средствам, использующим радиофизический подход к проблеме [2-3], относятся биоакустические установки, реализующие различные методы акустического отпугивания. Они широко применяются для обеспечения орнитологической безопасности аэропортов, при охране садов, складов зерновых культур и в прочих местах ненужного скопления птиц. Данные устройства состоят из блока аппаратуры воспроизводящей звуковые отпугивающие сигналы в заданном режиме. В качестве воспроизводимых сигналов обычно используются записи естественных криков «бедствия» и «тревоги» различных видов птиц, звуков различных хищников, выстрелов из охотничьих ружей, сирен и др. Их недостатком, на наш взгляд, является ненаправленное звуковое излучение, приводящее одновременно к нежелательному воздействию на окружающую среду (люди и другие биообъекты), а также привыкание птиц к данному типу отпугивания в зоне действия данных устройств.

Наиболее продвинутыми решениями является использование дистанционных технологий управления отпугиванием птиц, работающих на предотвращение столкновений самолетов с птицами над взлетно-посадочной полосой аэродрома. Такая система включает множество станций, расположенных вдоль взлетно-посадочной полосы аэродрома, и соединённых двухсторонней линией связи с удаленным пунктом для контроля и управления ими. Каждая станция состоит из взаимосвязанных, расположенных отдельно модулей (блоков), осуществляющих функции наблюдения, обнаружения, распознавания, отпугивания, дистанционного мониторинга и регистрации данных. Функции обнаружения реализуются на основе данных камер видеонаблюдения (тепловизионных и дневных стереокамер), которые постоянно ведут наблюдения за пространством над охраняемой территорией на предмет входящих в неё летающих объектов. Эти данные через блок управления передаются в центр дистанционного мониторинга, где обрабатываются, анализируются и принимается решение. Как только летящий объект обнаружен, и он распознается как птица, в это направление оператором ориентируется акустический модуль отпугивания, который излучает соответствующий звуковой сигнал, вызывающий эффект испуга птицы для изменения курса её полета и покидания контролируемой зоны.

Цель наших разработок заключается в создании автоматической адаптивной установки акустического отпугивания птиц, определяющей их наличие в зоне действия работы установки и работающей только в этом случае с выборочным воздействием на конкретный вид птиц. Это должно повысить эффективность работы акустических отпугивателей птиц путем их избирательного воздействия, а также уменьшить эффект привыкания птиц к звуковым сигналам и нежелательное воздействие звуком на окружающих.

С лета 2017 г. в аэропорту г. Томска проводятся испытания, отработка выполнения задач и опытная эксплуатация различных установок отпугивания птиц (Рис. 1). На его территории в 2016-2017 гг. было три столкновения самолётов с серыми воронами, одно из которых привело к серьёзному повреждению двигателя воздушного судна и значительным финансовым издержкам аэропорта. Потребовалось улучшение орнитологической безопасности аэропорта. К этому времени у нас был накоплен определенный опыт и задел в разработке мощных излучающих акустических антенных решеток, которые и было предложено использовать для отпугивания птиц.

Эффект влияния направленного излучения на птиц в аэропорту вначале был продемонстрирован на 21-элементной антенной решетке (рис. 1,а). Затем было разработано и испытано 2 типа биоакустических установок на 25-элементной антенной решетке с различными видами преобразователей и опор (рис. 1,б; рис. 1,в). Последняя включала в себя встраиваемый микрокомпьютер с архивом сигналов и управлением режимом работы. Для видеофиксации орнитологической обстановки в заданном секторе углов наблюдения биоакустическая установка дополнительно оснащается видеокамерой (рис. 1,г).



Рисунок 1. Акустический излучатель на 21-элементной антенной решетке (а), биоакустическая установка на 25-элементной антенной решетке (б), биоакустические установки (в) компании «Два крыла» (слева) и на 25-элементной антенной решетке в аэропорту г. Томска, излучатели на антенных решетках и биоакустическая установка с видеокамерой (справа, г).

В результате для улучшения эффективности отпугивания птиц была разработана биоакустическая установка нового типа, состоящая не только из акустического излучателя, но и встроенной системы видеонаблюдения. Данный комплекс решает задачи обнаружения птиц на территории аэропорта при помощи средств видеонаблюдения и, при наличии конкретного вида птиц, воспроизведения соответствующего акустического сигнала отпугивания в автоматическом режиме.

Наличие в составе установки цифровой видеокамеры и встраиваемого микрокомпьютера на четырехъядерном процессоре со специализированным программным обеспечением обеспечивает решение задач идентификации наличия и вида птицы, а также выбор излучаемого сигнала для отпугивания и режима работы. Программа реализована в среде разработки Qt Creator на языке C++ с использованием библиотеки OpenCV. В библиотеке OpenCV данный метод реализован в виде классификатора. Для обучения классификатора собиралась и выбиралась база изображений птиц, которые необходимо определить в видеопотоке данных видеокамеры. При подаче на вход классификатора потока видеоизображений, на выходе выдается решение: либо на изображении есть искомый объект (птица) и включается излучение звукового сигнала для отпугивания, либо искомого объекта нет и сигнал не посылается. Зафиксированные с помощью цифровой видеокамеры изображения сохраняются на SSD-накопителе компьютера.

Проводился анализ статистики обнаружения птиц. Вероятность обнаружения по обучающей выборке составила 98.2%. Высокий процент обусловлен тем, что объекты на проверочных изображениях классификатора сделаны в схожей с обучением среде.

Таким образом, положенное в основу разработки отпугивающей установки решение по созданию автономного автоматизированного акустического излучателя направленного избирательного действия, оснащенного системой технического зрения с элемен-

тами искусственного интеллекта и возможностью отслеживания орнитологической обстановки, идентификации вида птицы в зоне работы данной установки и выбора воздействующего сигнала из архива заложенной фонотеки, повышает эффективность отпугивания птиц. В целом, в результате принятых мероприятий, с 2018 года в аэропорту г. Томска не было зафиксировано ни одного столкновения воздушного судна с птицами.

Вторая проблема орнитологической безопасности, требующая решения, связана с высоковольтными линиями электропередачи (ЛЭП). Птицы нередко приводят к короткому замыканию на линии, отключению передачи электроэнергии и гибнут сами. Это наносит экономический ущерб и существенный урон популяции пернатых, в том числе краснокнижных. Утверждается, что от ударов тока ежегодно гибнут миллионы птиц, десятки тысяч из которых занесены в Красную книгу РФ. Эксплуатация ЛЭП без оснащения специальными современными птицевозащитными (птицеотпугивающими) устройствами создает угрозу уничтожения генофонда редких и исчезающих видов птиц России. Особую тревогу вызывает размещение таких ЛЭП на территории заповедников, национальных парков и других особо охраняемых природных территориях. От ЛЭП страдают практически все пернатые, но у экологов есть список наиболее уязвимых птиц, где перечислено более ста видов. Есть там и особо ценные, редкие, краснокнижные особи. Но больше всего погибает врановых, потому что это самое распространенное в России семейство. Гибель птиц зависит и от местности. Если ЛЭП проходит через поля, то столбы (мачты) являются идеальной присадой для хищных птиц и сов, здесь их гибнет значительно больше.

У Минприроды РФ есть нормативы оценки стоимости погибших птиц, по которым суд определяет сумму штрафа виновнику за ущерб для живой природы. Важно только, кто это вовремя обнаружит и представит в суд.

Защитники природы говорят, что самый простой выход — установка птицевозащитных (птицеотпугивающих) устройств на мачты ЛЭП. Их разработки ведутся с 1980 г., однако обнадеживающих результатов до сих пор нет. Без законодательных мер ситуация не изменится к лучшему. Таким образом и в случае с ЛЭП стоит задача по разработке эффективных отпугивателей птиц и решения проблемы орнитологической безопасности.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00750, <https://rscf.ru/project/22-29-00750/>, на ИМКЭС СО РАН.

1. Кухта А.Е., Красненко Н.П., Раков А.С. Динамика пребывания врановых птиц на территории аэропорта «Томск» и безопасность полетов // Вестник Тувинского государственного университета. Естественные и сельскохозяйственные науки. № 1(1). 2023. С. 2-22.

2. Красненко Н.П., Кухта А.Е., Раков А.С. Радиофизические методы в обеспечении орнитологической безопасности объектов и территорий // Шарыгинские чтения. – Материалы четвертой международной научной конференции ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации. –Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2022. С. 5-14.

3. Krasnenko N.P., Vlasov E.V., Rakov A.S. Radio physical methods of ensuring ornithological safety of objects and territories // Russian Physical Journal. Vol. 66. No. 4. August 2023. P. 479-484.

## О ПОДХОДАХ К ВЫБОРУ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЕРХНЕГО КОЖУХА ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ УСТАНОВКИ РАДИОМЕТРА CNR4

Кустов О.В.<sup>1</sup>, Алексенко В.О.<sup>2</sup>, Ивлев Г.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
sertyky78@gmail.com

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск,  
vl.aleksenko@mail.ru

<sup>3</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, ivlev@iao.ru

Сотрудниками Института оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН ведется непрерывный мониторинг атмосферных параметров в приземном слое атмосферы в обсерватории «Фоновая», расположенной на восточном берегу реки Оби, в 60 км к западу от Томска (56°25' с.ш., 84°04' в.д.) [1]. С учётом требований, предъявляемых ВМО к приборам для проведения атмосферных исследований на сетевых станциях, в обсерватории с помощью радиометра CNR4 ведется мониторинг проходящего и исходящего коротковолнового и длинноволнового излучения [2].

В докладе приводится обоснование выбора материала для изготовления верхнего кожуха вентиляционной установки для радиометра CNR4, представлена 3D модель и изготовленный кожух.

При выборе наилучшего материала для изготовления вентиляционного кожуха, были проведены механические испытания на прочность трех типов филоментов: полилактид (PLA) производитель ООО "Грег", полиэтилентерефталатгликоль (PET-G) производитель ООО "Грег", полиуретан (BFlex) производитель BESTFILAMENT.

Предварительно для каждого типа филомента изготовлено по 6 образцов на 3D принтере Ender3:

- 1) D638-14 ТИП:V (2 штуки)
- 2) ГОСТ 33519-2015 ТИП:А (2 штуки)
- 3) ГОСТ 4648-2014 (2 штуки)

Образцы исследованы на упругость, растяжение и сжатие на многофункциональной установке INSTRON 5582 в ИФПМ СО РАН.

При испытание на упругость на изгибе применяются образцы по ГОСТу 33519-2015 ТИП:А.

Все формулы, относящиеся к свойствам при изгибе, справедливы только для линейной зависимости изгибающего напряжения от относительной деформации, поэтому для большинства пластмасс формулы точны только при малых значениях прогиба, однако расчет по данным формулам можно использоваться при сравнении пластмасс. Диаграммы нагружения при изгибе представлены на рис. 1.

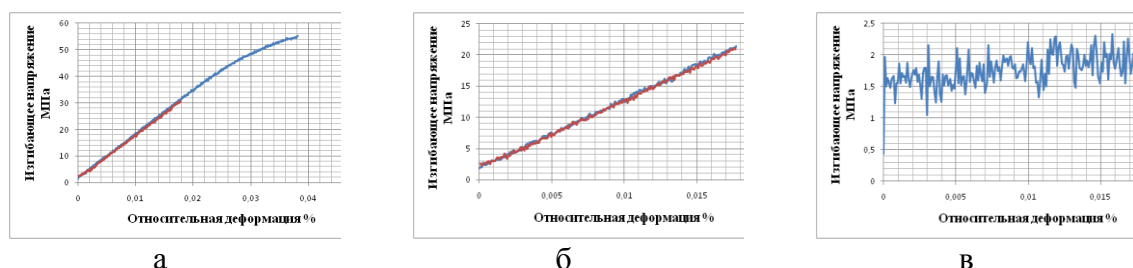


Рисунок 1. Диаграммы нагружения при изгибе образцов: PLA (а), PET-G (б), BFlex (в).

В табл. 1 представлены результаты расчета модуля упругости при изгибе.



**Таблица 1. Модуль упругости при изгибе.**

Материал	Модуль упругости при изгибе, МПа
PLA	1646±20
PET-G	1027±15
BFlex	49±5

Диаграммы нагружения при растяжении представлены на рис.2.

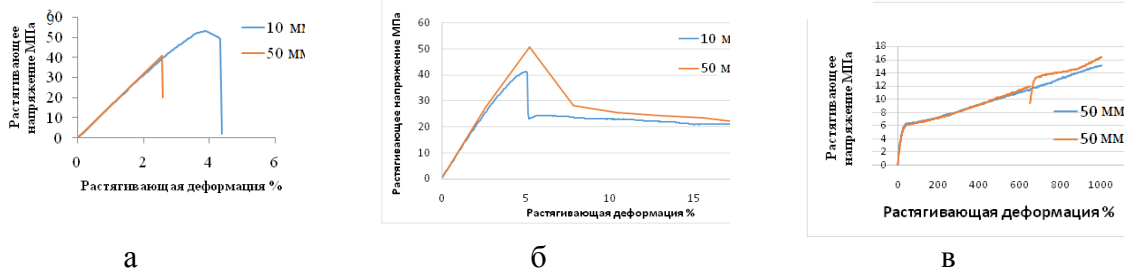


Рисунок 2. Диаграммы нагружения при растяжении образцов: PLA (а), PET-G (б), BFlex (в).

На рис. 2,а видно, что для PLA предел прочности при скорости нагружения 10 мм/мин составляет 53 МПа. С увеличением скорости испытания до 50 мм/мин предел прочности образцов снижается и составляет 43 МПа. Для PET-G предел прочности при скорости испытания 10 мм/мин составляет 40 МПа. С увеличением скорости испытания до 50 мм/мин предел прочности образцов возрастает и составляет 50 МПа (рис. 2,б). BFlex (рис. 2,в) обладает высокой степенью деформации (больше 1000%) При этом предел прочности составляет 15 МПа. Стоит отметить, что скорость растяжения не влияет на предел прочности и деформацию образцов.

Диаграммы нагружения при сжатии представлены на рис.3.

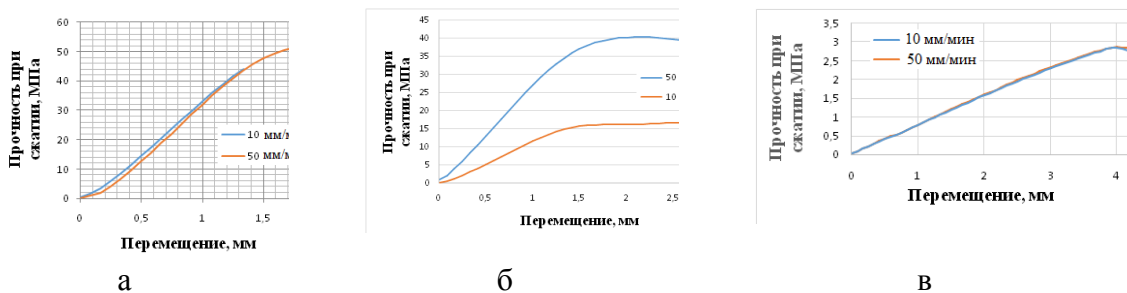


Рисунок 3. Диаграммы нагружения при сжатии образцов: PLA (а), PET-G (б), BFlex (в).

На рис. 3,а видно, что для PLA предел прочности при сжатии составляет 44 МПа, при этом образцы сжались на 1,35 мм. Скорость нагружения не влияет на предел прочности и деформацию образца при сжатии. Для PET-G (рис. 3,б) при скорости нагружения 10 мм/мин предел прочности при сжатии составляет 15 МПа. С увеличением скорости испытания (50 мм/мин) предел прочности повысился до 44 МПа. Для BFlex (рис. 3,в) варьирование скорости испытания на сжатие не повлияло на значение предела прочности при сжатии и деформацию. Образцы обладали пределом прочности 2,6 МПа.

По результатам проведенных испытаний было выявлено, что лучшими механическими свойствами обладает пластик марки **PET-G**. Данный пластик был использован для изготовления верхнего кожуха вентиляционной установки.



На основе предоставленной модели радиометра была создана 3D модель вентиляционного кожуха (рис.4а,б). После выбора материала с помощью аддитивной технологии была изготовлена деталь (рис.4в).

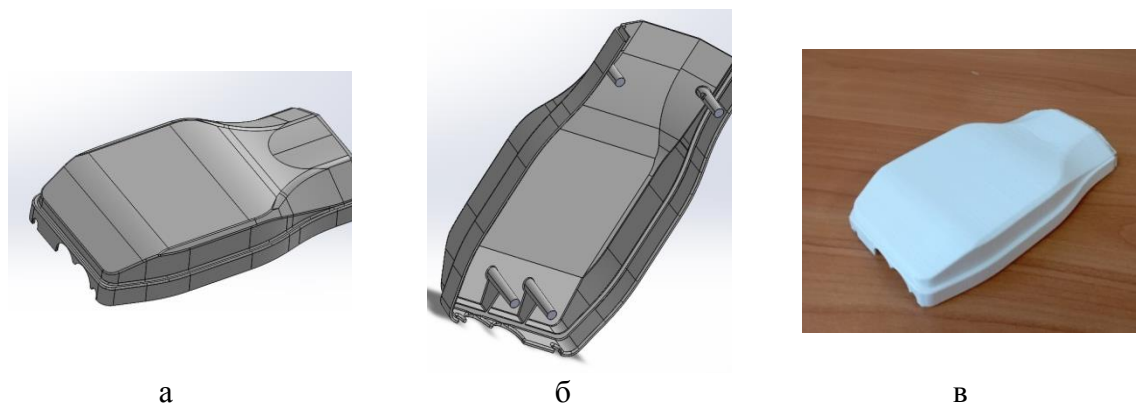


Рисунок 4. Верхний кожух: 3D модель (а,б) и изготовленная деталь (в).

Работа выполнена при поддержке государственных заданий ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0010 и ИОА СО РАН.

1. 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 Fonovaya Observatory, West Siberia: current status and future needs // Proceedings of SPIE.2018. V.10833. CID: 10833 7Z. [10833-189]. doi: 10.1117/12.2504388.

2. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Складнева Т.К., Фофонов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть I. Методические аспекты и технические характеристики // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т.35. №9. С.759-765.

## ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ И СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ

*Кустов О.В.<sup>1</sup>, Ивлев Г.А.<sup>2</sup>, Складнева Т.К.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
sertyky78@gmail.com

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, ivlev@iao.ru,  
tatyana@iao.ru

В последние десятилетия на Земле наблюдается глобальное потепление климата. Поэтому, чтобы снизить негативные последствия для окружающей среды, особенно актуальным становятся исследования, направленные на уточнение механизмов его образования. Причину роста температуры воздуха Международная группа экспертов по изменению климата связывает с изменением радиационного баланса Земли, основными составляющими которого являются суммарная радиация и альbedo подстилающей поверхности. Колебания потоков солнечной радиации определяются факторами, вклад каждого из которых переменный и зависит от физико-географических и климатических особенностей региона.

Сотрудниками Института оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН ведется непрерывный мониторинг атмосферных параметров в приземном слое атмосферы на 11 постах, расположенных на территории Западной Сибири. Проводится анализ вариаций и динамики изменения естественного излучения в разных спектральных диапазонах.

В докладе представлены результаты экспериментов, проведенных в феврале–марте 2023 г. в городских условиях и фоновом районе, по распространению фотосинтетически активной радиации (ФАР) в приземном слое атмосферы и снежном покрове.

Был создан измерительный стенд для регистрации и обработки данных. В экспериментах были использованы 6 датчиков PQS1 PAR фирмы Kipp&Zonen, измеряющих ФАР. Для круглосуточной записи данных с датчиков PQS1 использовано многоканальное записывающее устройство CR10XWIRINGPANEL от компании CAMPBELL SCIENTIFIC INC, позволяющее записывать и сохранять данные с шести датчиков в течение нескольких дней. Настройка периода записи данных, количества датчиков и размерности полученных данных проводилась с помощью программы PC400 компании CAMPBELL SCIENTIFIC INC. Для постоянного визуального контроля над полученными данными использована программа PC208W 3.2.

Для измерения уровня ФАР в снежном покрове с помощью PQS1 PAR нужно было соблюсти несколько требований. Во-первых, необходимо было добиться горизонтальности размещения датчика в снежном покрове. Во-вторых, над датчиком в радиусе 60 см не должен быть поврежден снежный покров, т.к. согласно [1] снежный покров в 60 см можно рассматривать как совершенный изолятор. Для выполнения данных требований была разработана технология установки датчиков и специальное устройство для этого. Устройство представляет собой алюминиевую трубу со специальной насадкой для введения датчика в снежной толще (рис. 1,а). Датчик устанавливается в устройство и помещается на нужной глубине горизонтально в снежную толщу с северной стороны. После установки датчика устройство вынимается из снежного покрова, а датчик остается в снегу в том положении, в каком его поставили (рис. 1,б). Также была изготовлена стойка для измерения общей приходящей и отраженной ФАР, и азимутальная установка, которая позволяла определить значения прямой фотосинтетически активной радиации.

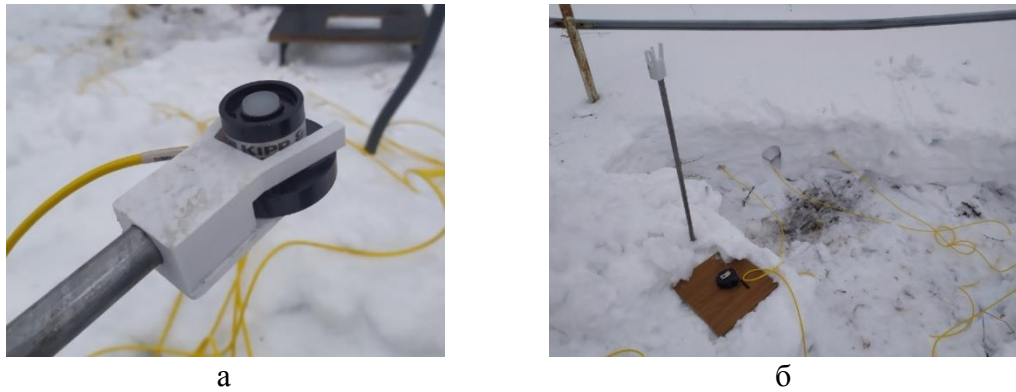


Рисунок 1. Устройство для правильного расположения датчика в снегу (а), установленные датчики (б).

Первый эксперимент проводился в ясную солнечную погоду. Местом проведения эксперимента стала крыша станции высотного зондирования ИОА СО РАН, расположенной в Академгородке. Здание возвышается над окружающей растительностью и обеспечивает возможность проведения эксперимента. Снежный покров не был поврежден внешними факторами, его высота превышала 50 см.

С помощью двух датчиков PQS1 была измерена проходящая и отраженная фотосинтетически активная радиация и рассчитано альbedo подстилающей поверхности как отношение отраженной к проходящей радиации. Получили альbedo снежного покрова  $A=87,4\%$ . С помощью установки для определения значений прямой ФАР было выяснено, что  $93,2\%$  ФАР приходится на прямое излучение.

Для определения ослабления ФАР в зависимости от высоты снежного покрова над приёмной оптической частью датчиков была выбрана открытая площадка и с северной стороны сделана траншея, вдоль которой устанавливались датчики на глубину 5, 20, 35 и 50 см. Датчики устанавливались вручную. На рис.2 приведены результаты измерения ФАР на разных глубинах в течение 2,5 часов.

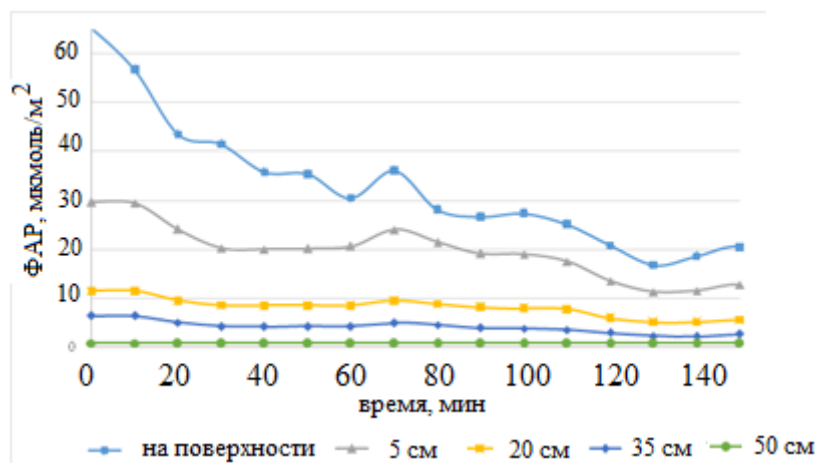


Рисунок 2. Изменение ФАР на глубине 5, 20, 35 и 50 см снежного покрова.

В табл.1 приведены: значения ФАР измеренные на глубине слоя (поверхностные значения ФАР на отметке «0» определялось как разница проходящей и отраженной ФАР); коэффициенты ослабления  $\alpha$  и прозрачности  $p$  для всех слоев снега, рассчитанные по формулам [1]:

$$\alpha = \frac{\ln \frac{S_{zi}}{S_{zi+1}}}{z_{i+1} - z_i},$$

где  $S_{z_i}$  и  $S_{z_{i+1}}$  – подснежная радиация на глубине  $z_i$  и  $z_{i+1}$ .

$$p = e^{-\alpha}$$

**Таблица 1. ФАР, коэффициент ослабления и коэффициент прозрачности на разных глубинах снежного слоя (городские условия).**

Толщина снега, см	0	0-5	5-20	20-35	35-50	0-20	0-50
ФАР, мкмоль/м <sup>2</sup>	41,0	20,270	8,580	4,247	0,765	8,58	0,765
Коэффициент ослабления, см <sup>-1</sup>	-	0,141	0,057	0,047	0,114	0,078	0,080
Коэффициент прозрачности	-	0,868	0,944	0,954	0,892	0,925	0,923

Второй эксперимент проводился в пасмурную погоду. Местом проведения эксперимента стала обсерватория «Фоновая» в 60 км от города Томска. Площадка для измерений располагалась рядом с радиационным блоком непрерывного мониторинга измерений суммарной и ультрафиолетовой радиации обсерватории «Фоновая» [2]. Снежный покров не был поврежден внешними факторами и достигал толщины в 60 см.

Для измерения альбедо использовалась специальная измерительная тренога, благодаря которой минимизируются внешние помехи на датчики.

С помощью установки для определения значений прямой ФАР было выяснено, что в период проведения эксперимента при сплошной облачности только 0,3% ФАР приходится на прямое излучение.

Для установки датчиков было выбрано незатемненное место и с северной стороны в снежном покрове сделана траншея, вдоль которой были установлены датчики. С учетом сложности горизонтальной установки датчиков вручную в первом эксперименте, датчики устанавливались с помощью специального устройства (рис.1). Датчики были установлены на глубину 9,5, 16 и 21 см. Весь эксперимент длился 1,5 часа. Результаты изменений в течении 18 минут приведены на рис. 3.

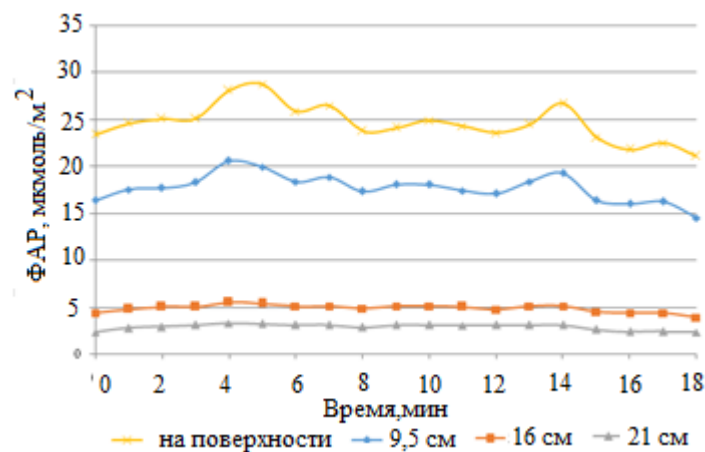


Рисунок 3. Изменение ФАР на глубине 9,5, 16 и 21 см снежного покрова.

В табл. 2 приведены значения ФАР, коэффициенты ослабления и прозрачности (по аналогии с табл. 1).

**Таблица 2. ФАР, коэффициент ослабления и коэффициент прозрачности на различных глубинах снежного слоя (фоновый район).**

Толщина снега, см	0	0-9,5	9,5-16	16-21	0-21
ФАР, мкмоль/м <sup>2</sup>	25,400	18,260	5,015	3,027	3,027
Коэффициент ослабления, см <sup>-1</sup>	-	0,035	0,199	0,101	0,102
Коэффициент прозрачности	-	0,965	0,820	0,904	0,903

По результатам измерений альbedo снежного покрова составило  $A=89\%$ . На рис. 4 приведены результаты расчета альbedo фотосинтетически активной радиации, полученные авторами в ходе эксперимента, а также альbedo коротковолновой радиации по данным радиометра CNR4.

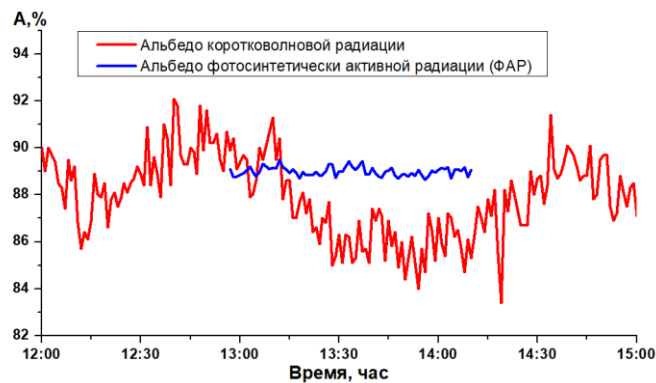


Рисунок 4. Измеренное альbedo.

В проведенных экспериментах в зависимости от толщины снежного слоя и состояния снега коэффициент ослабления менялся в диапазоне  $0,047-0,199\text{ см}^{-1}$ , а коэффициент прозрачности слоёв изменялся от 0,82 до 0,965. В первом эксперименте при ясном небе до глубины 20 см дошло 20 % ФАР, а до глубины 50 см 1,8% от пришедшей радиации на поверхность снежного покрова. Во втором эксперименте при пасмурной погоде доля ФАР на уровне 21 см составила 12%. В фоновом районе снег был влажный, и его структура была более плотная, чем в городских условиях. Коэффициент ослабления в 21 см слое был  $0,101\text{ см}^{-1}$  больше, а коэффициент прозрачности 0,904 меньше, чем в первом эксперименте ( $\alpha=0,078\text{ см}^{-1}$ ,  $p=0,925$ ).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. Л: Гидрометеорологическое изд-во. 1957. 177 с.

2. Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Складнева Т.К., Фофонов А.В. Радиационный блок измерительного комплекса обсерватории «Фоновая». Часть I. Методические аспекты и технические характеристики // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т.35. №9. С.759-765.

## ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

Лапина Л.Э.<sup>1</sup>, Воронай Н.Н.<sup>2,3</sup>, Дюкарев Е.А.<sup>2,4</sup>, Каверин Д.А.<sup>5</sup>, Пастухов А.В.<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт водных проблем РАН, г. Москва, l.e.lapina@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г.Томск

<sup>3</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск

<sup>4</sup>Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

<sup>5</sup>Институт биологии УрО РАН, г. Сыктывкар

Коэффициент эффективной теплопроводности - одна из важнейших теплофизических характеристик среды, знание которой необходимо для расчетов потоков тепла в почву. Кроме того, знание зависимости данной характеристики от температуры среды является ключевой проблемой в изучении пампинг-эффекта в почвах. Существование такого эффекта в мерзлотных почвах было показано в работе (Зырянов, 2013). Оценка этого эффекта для участка Большеземельской тундры сделана в работе (Лапина и др, 2021).

Цель данной работы – изучить изменчивость коэффициента эффективной теплопроводности в различных географических объектах. В дальнейшем слово эффективный пропускается. Описание участков исследования приводится в табл. 1.

1 участок. На рис.1 представлены результаты расчетов коэффициента теплопроводности. На рис. а) изменчивость этой характеристики во времени, на рис. б) зависимость от температуры среды. Здесь рассматривается только коэффициент на поверхности почвы. Графики показывают, что поиск зависимости коэффициента теплопроводности должен идти отдельно для отрицательных и положительных температур.

Зависимость ищем в виде функции:

$$k_t = aT^2 + bT + c + dT^{-2/3}, \quad (1)$$

отдельно для положительных и отрицательных температур. Эмпирические параметры a,b,c,d вычислены методом наименьших квадратов. Результаты представлены в табл.2.

3 участок. На рис. 2 представлены значения коэффициента теплопроводности при различных температурах почвы в отдельные дни. Как видно, форма зависимости в разные дни разная.

4 участок. Структура изучаемого коэффициента показана на рис.3, из которого видно, что структура для торфяных и минеральных почв метеостанции Бакчар сильно различается.

Этот рисунок показывает, что искомую зависимость можно описать функцией, предложенной в работе (Лапина и др., 2022).

На рис. 4 и 5 представлены графики соответственно для участков 5 и 6.

Рисунки 4 и 5 показывают, что на участках 5 и 6 зависимость можно описать полиномом 3 степени.

Расчеты коэффициента по затуханию амплитуд суточных колебаний по большей части зимнего периода на участках 3,4,5,6 практически все некорректны ввиду малости этих амплитуд, расчет в зимний период должен основываться на другом подходе. В летний период расчеты по большей части везде корректны.

**Таблица 1. Описание участков наблюдений.**

Номер	Описание	Координаты	Даты измерений	Сетка измерений
1	Плоский торфяной бугор в центре спущенного озера диаметром 20 на 20м До 50 см хорошо разложившийся торф	67°20'24.3''N 62°21'07.2'' E	29.08.2015- 15.08.2016	0,20,50, 100 см
2	Минеральный бугор, ерничково-ивняково-кустарничково-лишайниковая мелкобурговатая тундра, мерзлота 80 см до 3 см слабо разложившийся торф, ниже песок	67°20' 06,9'' N 62°24'56,4'' E	11.07.2007- 18.08.2009	0,10,20, 50,80,100 см
3	Наблюдательная площадка метеостанции Бакчар находится на террасе р.Бакчар на расстоянии около 1 км от реки. Почва дерново-глеевая тяжелосуглинистая	57°00' N 82°03' E	12.09.2011- 23.09.2020	0,2,5,10,15, 20,30, 40,60,80,120, 160,240,320 см.
4	Нижний рям Бакчарского болотного массива, почва торфяная олиготрофная, мощность торфа 2,2м	56°58' N 82°36' E	11.09.2011- 11.10.2021	0,2,5,10,15, 20,30, 40,60 см
5	Площадка А26 гарь (пожар 2010г). Высота площадки 766 м над у.м.		13.10.2011- 16.08.2020	0,2,5,10,15, 20,30, 40,60,80,120, 160,240,320 см.
6	Площадка А27 участок, не затронутый пожаром, высота 786м, расстояние от площадки А26 3,3 км. Сосновый лес с рыхлыми песчаными древне-золовыми отложениями.		13.10.2011- 16.08.2020	0,2,5,10,15, 20,30, 40,60,80,120, 160,240,320 см.

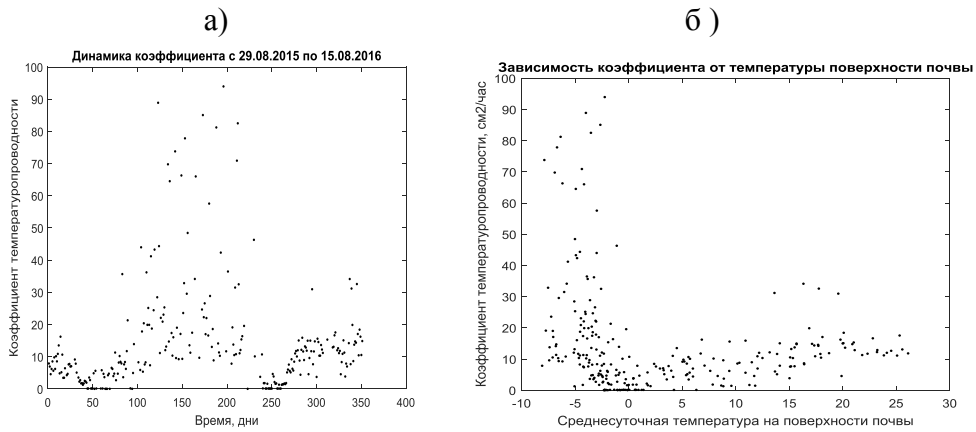


Рисунок 1. Коэффициенты температуропроводности по времени (а) и от температуры среды (б).

Таблица 2. Значения эмпирических констант формулы (1) для участков 1 и 2.

	Параметры			
	a	b	c	d
Участок 1				
Холодный период (149)	0.1963	-1.9350	8.8975	0.6216
Теплый период (123)	-0.0181	0.9772	1.4380	0.4712
Участок 2				
Холодный период (238)	-0.2779	-5.8905	20.4878	1.1173
Теплый период (294)	-0.033	1.1714	6.7055	-0.2567

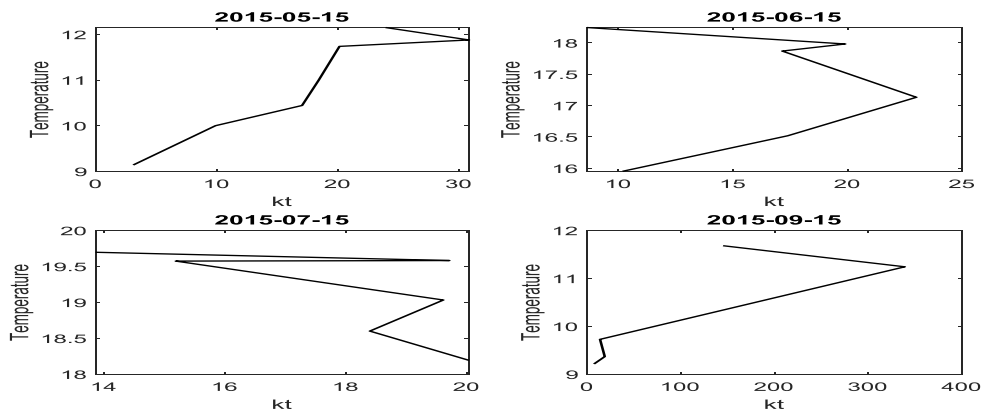


Рисунок 2. Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры почвы на участке 3.

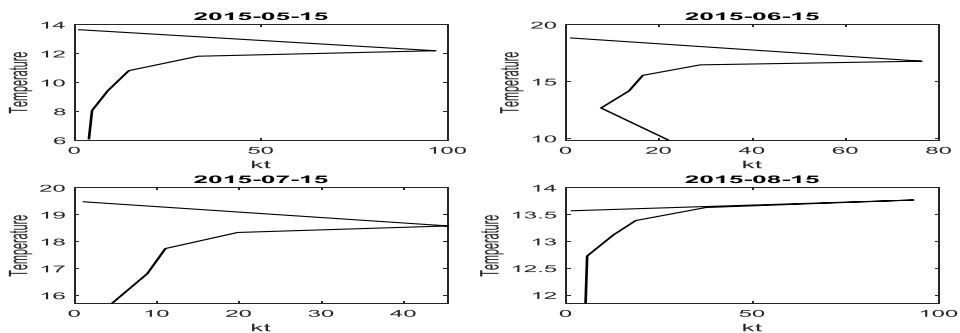


Рисунок 3. Зависимость коэффициента температуропроводности от температуры среды.



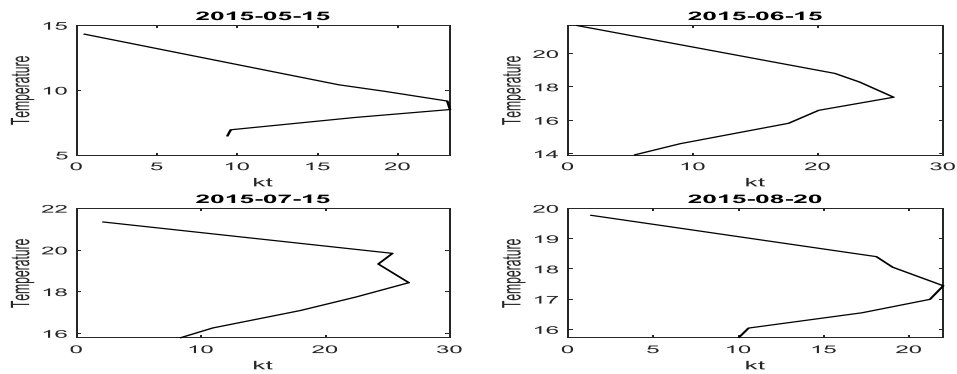


Рисунок 4. Коэффициент температуропроводности для участка 5.

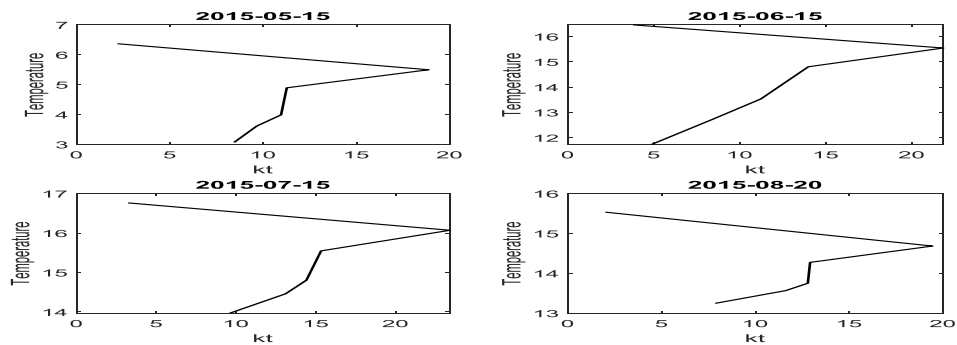


Рисунок 5. Коэффициент температуропроводности для участка 6.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВП РАН FMWZ-2022-0001 (N 122041100222-7).

1. Зырянов В.Н. Нелинейный пампинг-эффект в колебательных процессах в геофизике//Водные ресурсы, 2013, т.40, N3, с.227-239.
2. Лапина Л.Э., Каверин Д.А., Пастухов А.В. Оценка пампинг-эффекта в мерзлотных почвах типичной тундры европейского северо-востока России//Экологический мониторинг и моделирование экосистем, 2021, т.32,N3-4, с.100-111.
3. Лапина Л.Э., Дюкарев Е.А., Воропай Н.Н. Нелинейная волновая диффузия тепла в почву по данным Бакчарского болота и массива песчаных отложений Бадар (Тункинская котловина) //Сборник научных трудов конференции ENVIROMIS, 12-17 сентября 2022, с.251-254.

## ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПАСНЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ WRF

*Логинов А.С., Золотов С.Ю.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Задачей исследования являлось сравнение методик выделения экстремальных событий на примере краткосрочных погодных явлений в регионе Западной Сибири.

В исследовании применялись два метода — статистический, основанный на фильтрации данных синоптического масштаба и последующего выделения квантилей временного распределения аномалий метеовеличин (отклонений от среднего распределения за период наблюдения), и динамический, основанный на применении геострофического приближения как способа разделения величин с синоптической и мезомасштабной изменчивостью [1].

Были рассмотрены два экстремальных явления на территории Западной Сибири (ЗС):

1) Перемещение с севера полярного основного фронта и кратковременное вторжение тропической воздушной массы с последующим прохождением холодного фронта и наступлением арктической воздушной массы весной 2019-го (с 25 апреля по 5 мая), характеризовавшееся небольшими пространственными колебаниями давления в районе Томской области и прохождением области высокой температуры в южной части региона, протяженных вдоль границы Казахстана и Алтайского края.

2) Перемещение полярного фронта с северо-востока ЗС зимой 2020-го (с 20 по 30 декабря) сопровождавшееся резкими колебаниями давления границе ЗС: на южной 28-29 декабря и на северной 24-25 декабря. Области низких температур распространялись с северо-востока Красноярского края сначала в юго-западном направлении, а после смещаясь и расширяясь на юго-восток.

Предварительно, для тропосферы ЗС на уровнях 1000гПа, 850гПа, 700гПа, 500гПа с помощью модели WRF по данным реанализа NCEP GDAS/FNL с пространственным разрешением  $0.25^{\circ}$  и временным шагом 1ч рассчитывались основные метеорологические величины: температура ( $T$ ), влажность воздуха ( $q$ ), компоненты скорости ветра ( $u$ ,  $v$ ), геопотенциала ( $\Phi$ ) и относительная завихренность ( $\zeta$ ). Вычисления проводились для интервала времени продолжительностью десять суток, что позволило получить статистически обоснованные оценки.

Далее в исходных рядах подавлялась изменчивость суточного (24ч) масштаба и выделялась синоптического масштаба [2], соответствующего среднему периоду продолжительности жизни барического образования (2-7сут.).

Для выделения областей с экстремальными значениями метеорологических величин применялись интерквартильный размах ( $D$ ), т.е. разница между квантилями 0.75 и 0.25 и  $D$  — разница между квантилями 0.9 и 0.1. Последняя оценка использовалась для уточнения локализации области экстремальных величин.

Динамический методика основана на выделении геострофической части скорости ветра, которые, по определению, обеспечивают баланс между силой градиента давления и силой Кориолиса, что позволяет из уравнений баланса рассчитать соответствующую часть скорости ветра.

По получившемся значениям разницы квантилей  $D$  можно сказать, что для 2019 г. на высоте 1000 гПа наибольший температурный градиент в слое наблюдался севернее

Сибирских увалов до Обской губы, на высоте 500 гПа — в районе Барабинской низменности и по северной границе Западных Саян, в то время как зимой 2020 г. разница температур наиболее выражена на высоте 1000 гПа на северной границе Алтайского горного массива (рис. 1).

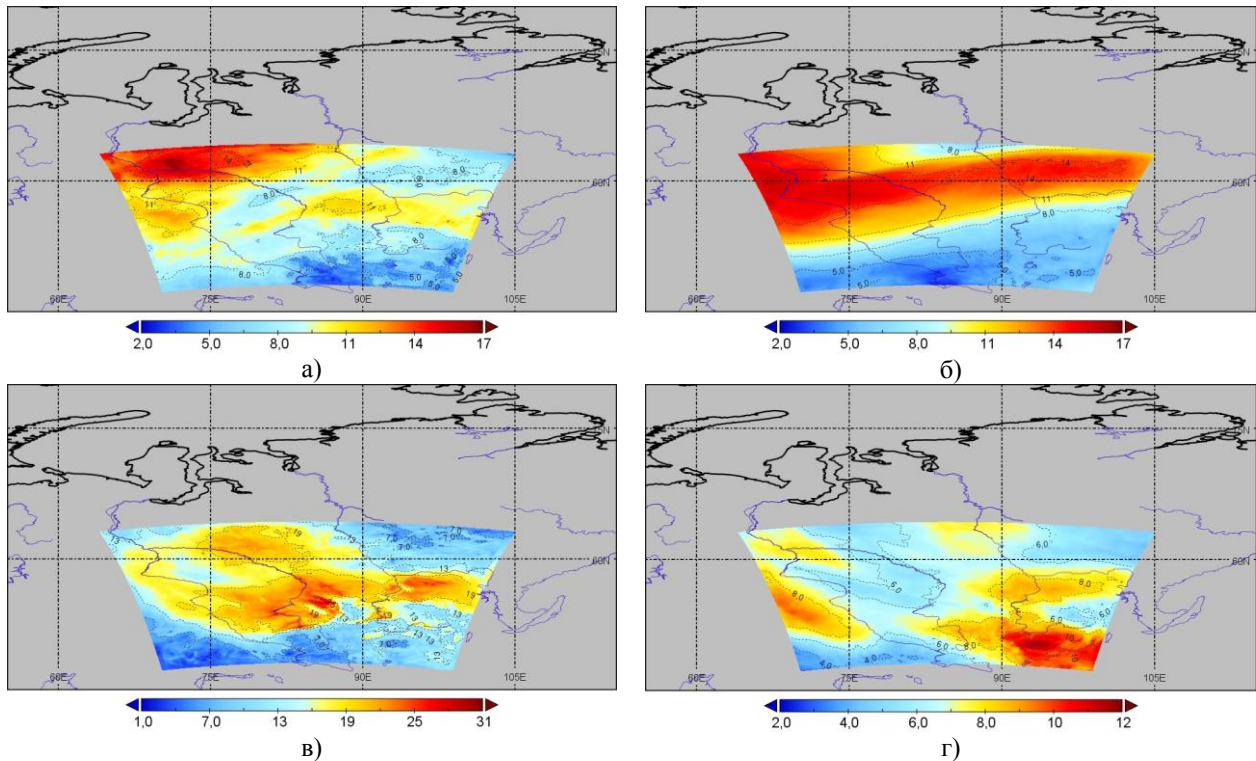


Рисунок 1. Распределение температуры на исследуемом участке ЗС в 2019 (а,б), 2020 гг. (в,г) на высотах 1000 гПа(а,в) и 500 гПа (б,г).

Следует отметить, что хотя распределение интерквартильного размаха скорости ветра подобно распределению для температуры, наибольший диапазон завихренности наблюдается в горных районах Алтая, а не в предгорных низинах (рис. 2).

Исследование было поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН, номер бюджетного проекта FWRG-20221-0001, регистрационный номер 121031300154-1.

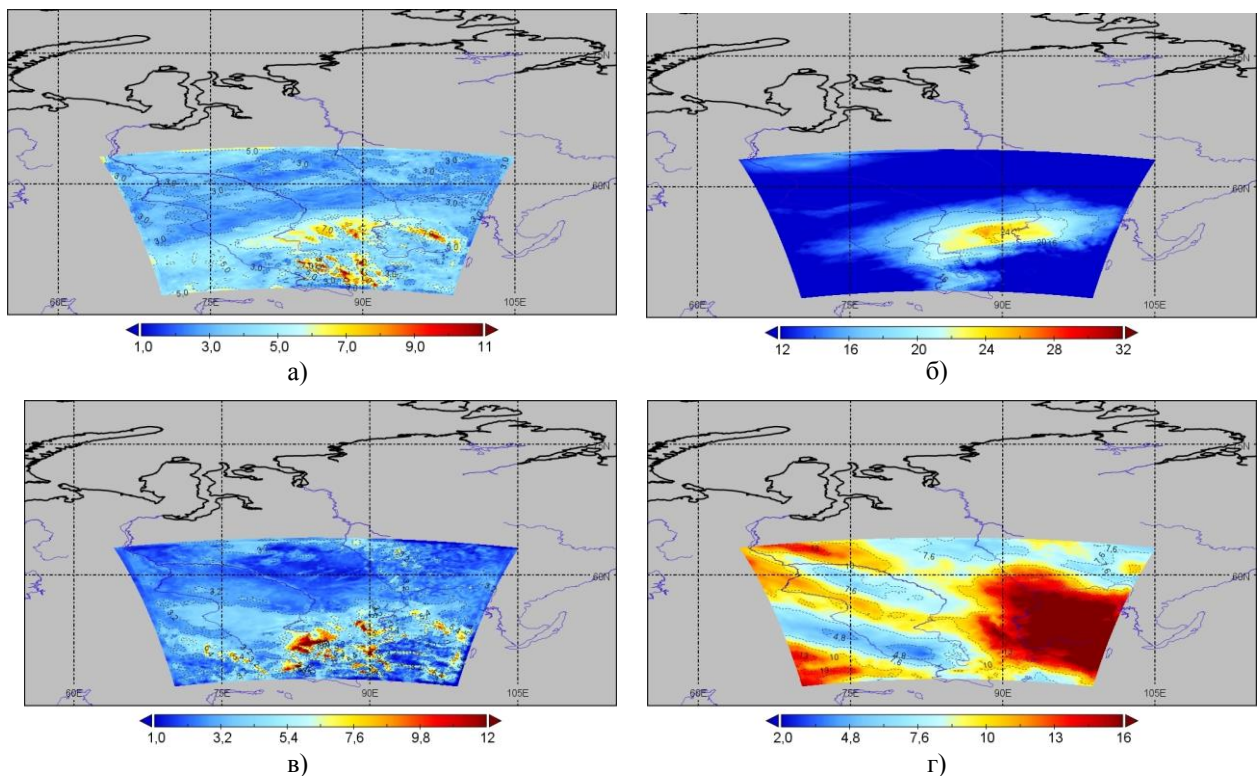


Рисунок 2. Распределение скорости ветра на исследуемом участке ЗС в 2019 (а,б), 2020 гг. (в,г) на высотах 1000 гПа(а,в) и 500 гПа (б,г).

1. A Gavrikov and V Stepanenko, Regional Climate Modelling: Methods of Obtaining the Mesoscale from High-Resolution Data//2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 231 012018

2. Логинов С.В., Елисеев А.В., Мохов И.И. Влияние негауссовой статистики атмосферных переменных на экстремальные внутримесячные аномалии// Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 307-317.

## ПОИСК АНОМАЛИЙ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОПУЩЕННЫХ ДАННЫХ ВО ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНОВ

*Макеев Д.А., Караваева К.Э.*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
makeev.da21@physics.msu.ru

Существенный вклад в формирование температуры воздуха атмосферы Земли вносит парниковый эффект [1]. Углекислый газ является самым воспроизводимым человечеством парниковым газом. Его содержание неуклонно растет с начала инструментальных измерений [2]. Экологи предупреждают, что если не удастся уменьшить выброс в атмосферу углекислого газа, то нашу планету может ожидать катастрофа, связанная с повышением температуры вследствие парникового эффекта. Подобные исследования приведены в работах [2-3]. Поэтому актуальной задачей является мониторинг динамики изменения данного показателя, т.е. сбор и проверка данных, восстановление утраченных результатов измерений и другие.

В работе анализируются статистические данные различных геофизических параметров для разных регионов, представленные в виде временных рядов. Под временным рядом понимают упорядоченный по времени набор значений исследуемого показателя. Также, если станция производит параллельные измерения различных параметров, то получаемые данные можно рассматривать как один многомерный ряд, в этом случае динамика одного параметра называется компонентой многомерного ряда. Все измерения производятся при помощи технических средств, для которых ввиду зависимости от внешних условий и недостатков конструкции устройств возможно появление аномальных значений и частичная или полная утрата данных за различные по длительности промежутки наблюдений. В работе рассматриваются способы выявления аномальных значений, а также замена их на статистически близкие к истинным, и методы восстановления утраченных данных.

Под аномалией принято понимать поведение ряда, которое несвойственно нормальному состоянию временного ряда. Аномалии можно классифицировать на точечные, коллективные и контекстуальные [4]. В [4] выделяют следующие три подхода к обучению моделей для поиска аномалий: с учителем, без учителя и промежуточный, в котором на вход берутся только нормальные данные. Для поиска аномалий можно использовать алгоритмы, которые основаны на статистических моделях; алгоритмы классического и глубоко машинного обучения. В этом исследовании для реализации поиска аномалий был выбран автоэнкодер [5] (промежуточный подход с использованием алгоритмов глубокого машинного обучения).

Данные были предоставлены ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН. Исследовались следующие показатели: концентрация углекислого газа и температура на различных высотах, а также для различных регионов: метеостанция в Твери и метеостанция "ASIA-FLUX" во Вьетнаме. Исходные данные (рис. 1) были разделены на обучающую, валидационную и тестовую выборку. Обучающая выборка была очищена от выбросов при помощи правила трех сигм. Из обученных моделей с разными гиперпараметрами (количество нейронов на слоях, коэффициент скорости обучения [6], размер батча, т.е. подвыборки данных) была выбрана та, которая имеет наименьшую абсолютную среднюю ошибку на валидационной выборке. После построения модели исследовались данные тестовой выборки на предмет наличия аномалий.

Для анализа аномалий был введен индекс состояния, который равен разнице между реальными и предсказанными моделью значениями. Если индекс состояния был больше определённого значения (в нашем случае 0.99 квантиль, т.е. выше этого значения всего 1% данных), то значение считалось аномальным.

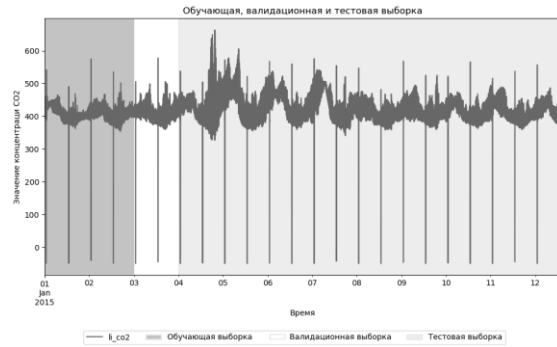


Рисунок 1. Исходные секундные данные концентрации углекислого газа. Вьетнам.

На рис. 2 представлены результаты работы алгоритма на валидационной и тестовой выборках на примере секундных измерений концентрации углекислого газа. В исходных данных в районе значений от 5 января 2015 наблюдается аномалия, т.к. индекс состояния превышает значение 0.99 квантиль. Стоит отметить, что модель обнаружила аномалии в данных от 6 и 7 января 2015.

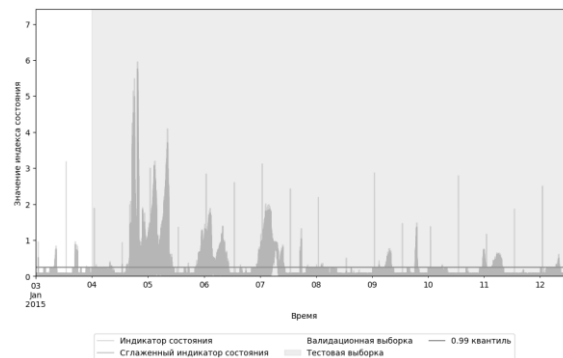


Рисунок 2. Индекс состояния. Сглаженный индекс состояния получен при помощи медианного фильтра по трем точкам.

Утраченные данные так же, как и помеченные невалидными, осложняют дальнейшую работу со статистическими методами, поэтому важно проводить восстановление таких наборов значений. Далее будем считать аномальные значения утраченными. Существует множество методов восстановления, начиная от простейших линейных методов и корреляционного анализа и заканчивая морфологическими методами и вейвлет-анализом.

Перед началом данной части исследования была произведена предварительная обработка данных: усреднение исходных секундных показателей и сглаживание при помощи скользящего среднего. Для моделирования применялись модели семейства ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) [7] – модели, совмещающие авторегрессионный метод, учитывающий влияние предыдущих значений ряда; скользящее среднее, позволяющее уменьшить остатки ряда (непрогнозируемые величины, от которых на прямую зависит ошибка модели); а также интегрирование ряда, что необходимо, в случае если ряд не стационарен, то есть его среднее значение не сохраняется во времени, и присутствует трендовая компонента.

В случае, если данные обладают сезонностью, используют модель SARIMA, включающая в себя несколько моделей ARIMA: одна для прогнозирования тренда, а вторая для прогнозирования сезонной составляющей. Также существует расширение данной модели для многомерных рядов: SARIMAX, в котором присутствует возможность уточнять прогноз при помощи добавления линейно связанных компонент.

На рис. 4 представлены результаты восстановления временного полученного из Вьетнама при помощи моделей семейства SARIMA и SARIMAX. Лучшие модели по метрикам RMSE [8] и AIC [10] имеют параметры (3,1,2) и (2,1,0,57). Как можно наблюдать, дифференцирование ряда улучшает результат, а использование линейно связанных компонент, в свою очередь существенно уточняет прогноз.

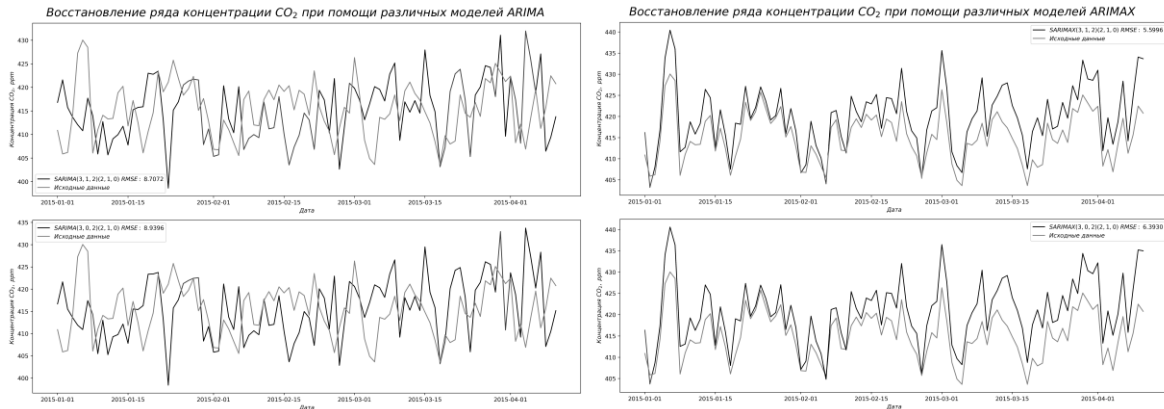


Рисунок 4. Модели SARIMA/SARIMAX. Вьетнам.

Вместе с этим, если в данных наблюдается высокая корреляция, можно воспользоваться моделями, основанными на этой взаимосвязи. Корреляционный анализ показывает, что компоненты ряда концентрации углекислого газа на разных высотах имеют высокую связь: коэффициент Пирсона равен 0.972478. Так в работе рассматривается восстановление при помощи метода линейной регрессии и анализа главных компонент. Линейная регрессия позволяет построить гиперплоскость в пространстве признаков (компонент ряда) с наименьшим отклонением для того, чтобы далее определять на ней значение искомой величины по заданным входным параметрам. Метод главных компонент основан на теореме Карунена-Лоэва [12], он позволяет дискретизировать временной ряд и выбрать наиболее значимые переменные величины. Таким образом, если в данных присутствует линейная связь, то выявив её при помощи этого способа, появляется возможность восстанавливать любую из коррелирующих компонент, что является главным преимуществом метода. На рис. 5 приведено сравнение всех использованных моделей. По метрике MSE [9] наилучшей моделью является линейная регрессия, ошибку этого же порядка имеет метод главных компонент. Модель SARIMAX, являющаяся лучшей моделью семейства, имеет ошибку на порядок больше.



Рисунок 5. Сравнение всех моделей. Вьетнам.

В случае анализа временного ряда параметров, полученных из Тверской области, высоко коррелирующими компонентами являются температура воздуха и температура почвы, коэффициент корреляции Пирсона равен 0.974319, однако измерения последней величины имеются только при положительном значении температуры воздуха, в силу особенностей наблюдательной станции, поэтому при восстановлении не удалось воспользоваться линейными методами. На рис. 6 приведены результаты восстановления ряда при помощи модели SARIMA/SARIMAX с параметрами (1,0,6) / (2,1,4,7) и различных дополнительных компонент. Аналогично результатам, полученным во Вьетнаме, добавление высоко коррелирующих компонент, таких как температура почвы, улучшают прогноз, в то время как при добавлении слабо связанных компонент результаты ухудшаются. Таким образом при добавлении давления ошибка по метрике MSE близка к модели SARIMA, не использующей данную взаимосвязь.

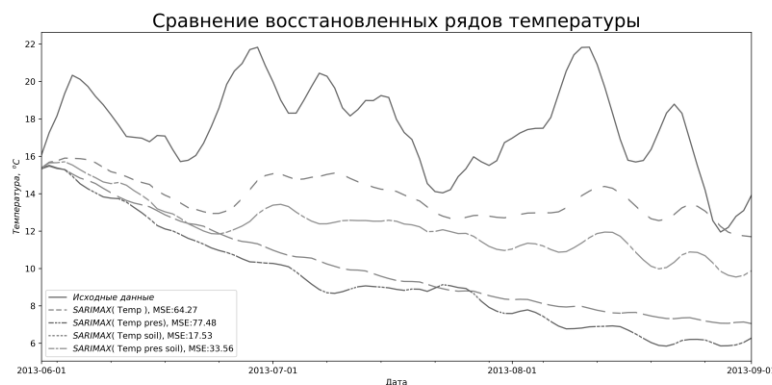


Рисунок 6. Сравнение всех моделей. Тверь.

В результате исследования были сделаны следующие выводы:

1) Построенная модель для поиска аномалий не всегда улавливает точечные аномалии. Это может быть связано с тем, что правило трех сигм не позволяет убрать все выбросы из обучающей выборки. В силу периодичности точечных аномалий модель может воспринять их как нормальные данные.

2) Модели, использующие линейные зависимости, являются наиболее точными, однако в случае если возможность их использования отсутствует, модели семейства ARIMA дают результаты с достаточной точностью.

3) В случае использования моделей семейства ARIMA, наиболее точными являются те, которые используют только высоко коррелирующие компоненты, в то время как добавление низко коррелирующей ухудшает прогноз, так как в данном случае модель переобучается. При использовании обоих вариантов предсказывающая способность алгоритма не превосходит моделей, использующих только высоко связанные компоненты, в тоже время не уступает моделям без дополнительной информации или с использованием низко коррелирующих данных.

1. Bakwin, P.S. Measurements of carbon dioxide on very tall towers: results of the NOAA/CMDL program / P.S. Bakwin, P.P. Tans, D.F. Hurst, C. Zhao // *Tellus*. – 1998. – Vol. 50. – Issue 5. – P. 401 - 415.

2. Kurbatova J., Tatarinov F., Molchanov A. et al. // *Environ. Res. Lett.* 2013. № 8.045028.

3. Haszpra, L. Trends and temporal variations of major greenhouse gases at a rural site in Central Europe / L. Haszpra, Z. Barcza, D. Hidy, I. Szilagyi, E. Dlugokencky, P. Tans // *Atmospheric Environmental*. – 2008. – Vol. 42. – Issue 38. – P. 8707 – 8716.

4. Banerjee A., Chandola V. and Kumar V. Anomaly detection: A survey // *ACM Computing Surveys*. – 2009. – Vol. 41. – Issue 15. – P. 1-58.

5. Tziolas, T., Papageorgiou, K., Theodosiou, T., Papageorgiou, E., Mastos, T., Papadopoulos, A. Autoencoders for Anomaly Detection in an Industrial Multivariate Time Series Dataset. // *Engineering Proceedings*. – 2022. – Vol. 18. – Issue 1. – P. 207 - 217.

6. Коэффициент скорости обучения [Электронный ресурс]: Коэффициент скорости обучения (Learning rate) – URL: <https://wiki.loginom.ru/articles/learning-rate.html>.

7. ARIMA [Электронный ресурс]: Документация библиотеки statsmodels, стабильная версия – URL: <https://www.statsmodels.org/stable/generated/statsmodels.tsa.arima.model.ARIMA.html>.

8. RMSE [Электронный ресурс]: Среднеквадратичная ошибка – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square\\_deviation](https://en.wikipedia.org/wiki/Root-mean-square_deviation).

9. MSE [Электронный ресурс]: Среднеквадратичная ошибка – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mean\\_squared\\_error](https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_squared_error).

10. AIC [Электронный ресурс]: Информационный критерий Акаике – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Akaike\\_information\\_criterion](https://en.wikipedia.org/wiki/Akaike_information_criterion).

11. Линейная регрессия [Электронный ресурс]: Линейная регрессия – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Линейная\\_регрессия](https://ru.wikipedia.org/wiki/Линейная_регрессия).

12. Теорема Карунена-Лоэва [Электронный ресурс]: Теорема Карунена-Лоэва – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема\\_Карунена-Лоэва](https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Карунена-Лоэва).



## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СТОХАСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РЯДОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

*Матюхина А.А.<sup>1,2</sup>, Воронай Н.Н.<sup>2,3</sup>, Игнатов А.В.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет

<sup>2</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

<sup>3</sup>Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск,

matyukhina\_nastya08@mail.ru, voronay\_nn@mail.ru, ignatov19521121@yandex.ru

Объект исследования Тункинская котловина – система межгорных понижений тектонического происхождения в горах Восточного Саяна в Республике Бурятия и Иркутской области, с юго-востока ограниченная хребтами Хамар-Дабана.

На зональные черты климата этого региона накладывается влияние местных факторов, что усложняет организацию метеорологических наблюдений и анализ климатического режима. Особенности микроклимата формируются в результате взаимодействия циркуляционных и радиационных факторов, свойств подстилающей поверхности. Сложный рельеф и индивидуальные геоморфологические условия способствуют формированию уникального микроклимата разных ландшафтов межгорных котловин Тункинской ветви.

Для мониторинга метеорологических параметров в Тункинской котловине сотрудниками ИГ СО РАН организовано 45 модельных площадок, на которых были установлены автоматические термографы и термогигрографы (устройства семейства iButton Data Loggers).

Площадки наблюдения расположены так, чтобы полученные данные характеризовали климатический режим основных типов ландшафтов, представленных на территории, с учетом особенностей рельефа и высотной поясности. Площадки находятся в интервале высот от 718 до 2119 м. Измерения приземной температуры воздуха фиксируются круглогодично с 2009г. с интервалом в три часа, синхронно с измерениями на сети метеорологических станций Росгидромета.

Термограф/термогигрограф (DS1922/DS1923) – автономное электронное устройство для измерения температуры и относительной влажности окружающей среды. Устройство накапливает данные измерений и сохраняет во встроенной памяти. Значения температуры воздуха фиксируются регистратором в диапазоне от –40 до 85 °С. Точность измерения температуры составляет 0,0625°С при погрешности ±0,5 °С. [1]. Возможность измерения температуры воздуха в различных средах, хранение значительного массива информации в памяти прибора, регистрация данных с регулируемой частотой и малогабаритные размеры позволяют успешно использовать автоматические датчики для множества задач современной науки [2-6].

Для применения автоматических термографов была проведена валидация данных с датчиков. Для подтверждения корректности использования термографа и репрезентативности полученных данных проведен сравнительный анализ рядов температуры с помощью автоматического оборудования, установленного в психрометрической будке, и психрометрической пары на метеостанции Тунка. Результаты сравнительной оценки данных измерений термографами и измерений стандартными метеорологическими приборами показали, что при использовании указанных приборов имеется возможность получить корректные данные, отражающие метеорологический режим территории, и расширить возможности мониторинга природно-климатических процессов [7].

Однако за 15 лет наблюдений в рядах данных имеется значительное количество пропусков, как по техническим причинам, так и вследствие влияния природного и человеческого факторов. Исключение и игнорирование отсутствующих значений искажает статистические свойства выборки и ухудшает результаты, полученные на ее основе.

Цель данной работы – восстановить пропуски в данных и создать непрерывный ряд приземной температуре воздуха на территории Тункинской котловины, который можно использовать как для объективных оценок климатических изменений, так и в науках, смежных с климатологией.

Имеются различные методы, которые позволяют рассчитать отсутствующие значения температуры воздуха по значениям на ближайших пунктах наблюдений [8]. Один из возможных методов заключается в нахождении коэффициентов линейной регрессии, связывающих температуру воздуха на изучаемой площадке с температурой воздуха на площадке-аналоге в период их параллельной работы. Далее по полученному уравнению регрессии выполняется расчёт отсутствующих значений температуры воздуха на искомой площадке по известным значениям температуры воздуха на площадке, имеющей наилучшую зависимость. Перебор в ручном режиме множества регрессионных уравнений для поиска варианта с максимально возможной точностью восстановления – очень трудоемкий и продолжительный процесс.

Нами использована программа «Стохастическое моделирование», разработанная А.В. Игнатовым в Институте географии им. В.Б. Сочавы СО РАН [9]. Алгоритм ориентирован на построение для каждой загруженной переменной множества однофакторных моделей зависимости с использованием оператора регрессии – «Линейный аддитивный», выбирается модель с наилучшей зависимостью. По имеющимся оценкам значений переменных вычисляется также контрольная мера точности. Отметим, что данная процедура не уточняет имеющиеся приближенные оценки переменных, а только заполняет пробелы в исходных данных (рис. 1).

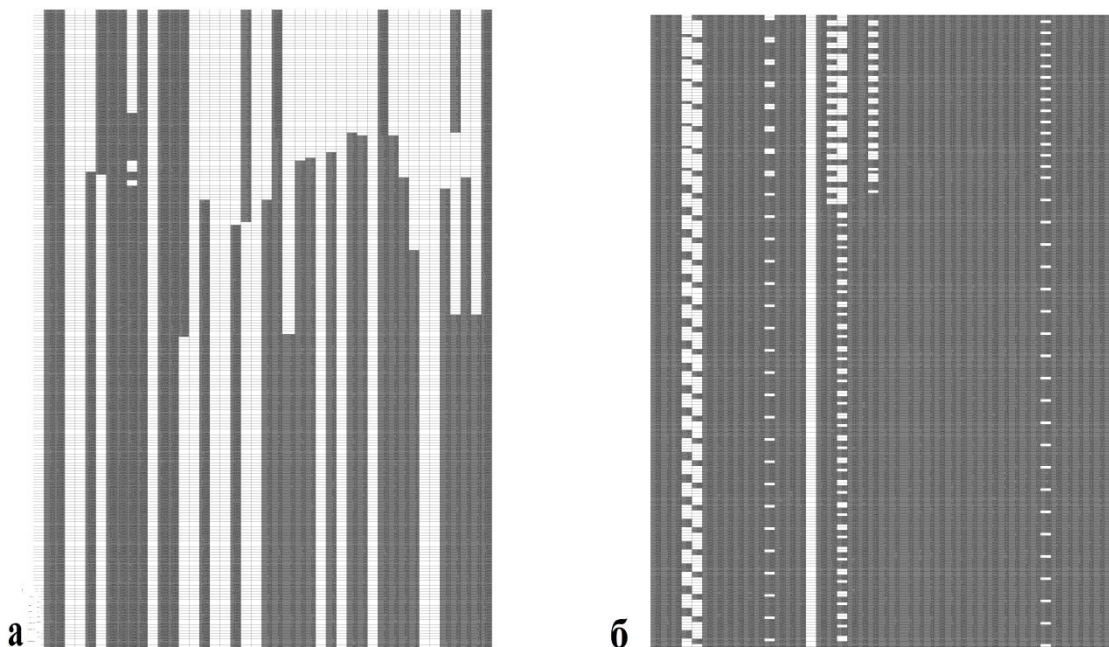


Рисунок 1. Пример операции заполнения пропусков в данных для августа 2019 г. а – исходный ряд данных, б – ряд с восстановленными пропусками в данных.

На рисунке 1 представлен пример применения операция «Заполнение пропусков в данных» для августа 2019 года. Таким образом, операция «Заполнение большого числа

пропусков в исходных данных» программы «Стохастическое моделирование» при первом прогоне заполнила большую часть пропусков и успешно применима для аналогичных задач.

1. Что такое термохрон? // НТЛ «ЭЛИн» (научно-техническая лаборатория «Электронные инструменты») [Электронный ресурс]. — <https://elin.ru/-Thermochron> (дата обращения: 20.03.2023).

2. Bell S.C., Heard G.W., Berger L., Skerratt L.F. Connectivity over a disease risk gradient enables recovery of rainforest frogs // *Ecological Applications*. — 2020. — N 30. — P. 2152. — DOI: 10.1002/eap.2152.

3. Elmes A., Healy M., Geron N., Andrews M.M., Rogan J., Martin D.G., Sangermano F., Williams C.A., Weil B. Mapping spatiotemporal variability of the urban heat island across an urban gradient in Worcester, Massachusetts using in-situ Thermochrons and Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) data // *GIScience and Remote Sensing*. — 2020. — Vol. 57. — P. 845–864.

4. Loveday J., Loveday G.K., Byrne J.J., Ong B.-L., Morrison G.M. Modified iButtons: A low-cost instrument to measure the albedo of landscape elements // *Sustainability*. — 2019. — N 11 (24). — P. 6896. — DOI: 10.3390/su11246896.

5. Navarro-Serrano F., López-Moreno J.I., Azorin-Molina C., Buisán F., Dominguez-Castro A., Sanmiguel-Vallelado E., Alonso-González E., Khorchani M. Air temperature measurements using autonomous self-recording dataloggers in mountainous and snow covered areas // *Atmospheric Research*. — 2019. — Vol. 224. — P. 168–179. — DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.03.034.

6. Lundberg A., Gustafsson D., Stumpp C., Kløve B., Feiccabrino J. Spatiotemporal variations in snow and soil frost — A review of measurement techniques // *Hydrology*. — 2016. — Vol. 3 (3). — P. 28. — DOI: 10.3390/hydrology3030028.

7. Василенко, О. В. Автоматический мониторинг температуры и влажности воздуха в горно-котловинных ландшафтах Прибайкалья / О. В. Василенко, Н. Н. Воропай // *География и природные ресурсы*. — 2022. — Т. 43, № 4. — С. 59-69. — DOI 10.15372/GIPR20220407. — EDNIROGG

8. Рубинштейн Е.С. Однородность метеорологических рядов во времени и пространстве в связи с исследованием изменения климата. Л., Гидрометеиздат, 1979, 80 с.

9. Пакет программ СТОХАСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ Версия 01 Формулировка и проверка гипотез. [Электронный ресурс]. — <http://irigs.irk.ru/science/im.html> (дата обращения: 20.03.2023).

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ПЕРЕНОСА АЭРОЗОЛЬНЫХ ПОЛЕЙ АТМОСФЕРЫ НАД ОЗЕРОМ БАЙКАЛ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Насонов С.В., Балин Ю.С., Клемашева М.Г., Коханенко Г.П., Новоселов М.М.,  
Пеннер И.Э.*

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, nsvtsk@gmail.com

Озеро Байкал является одним из уникальных природных комплексов нашей планеты. Это одно из наиболее древних и глубоких водоемов, большая часть обитающих видов которого – эндемична. Поэтому задачи связанные с контролем качества окружающей среды этого объекта, имеют общемировое значение. Особое место в вопросах природоохранной деятельности на территории озера Байкал занимают атмосферные исследования. Аэрозоль является одним из значимых составляющих атмосферы, в значительной степени определяя ее оптическое состояние, что в свою очередь оказывает влияние на радиационный баланс и, соответственно, на изменения климата нашей планеты [1-3]. Попадающие в атмосферу аэрозольные частицы могут иметь различное происхождение. Повышенное содержание аэрозольных примесей в атмосфере может быть вызвано как чрезвычайными ситуациями природного характера, к которым относятся извержения вулканов, песчаные бури, лесные пожары так и техногенного – промышленные выбросы, аварии на химически и радиационно опасных объектах. Это в свою очередь требует создания специализированных приборов для возможности круглосуточного и оперативного контроля столь широкого спектра загрязняющих веществ. Причем масштабы проведения необходимых комплексных исследований оптических и микрофизических характеристик аэрозоля могут изменяться от локальных наблюдений в одной точке (с помощью стационарных или передвижных мобильных установок), до изучения процессов крупномасштабного переноса атмосферных примесей (самолетные или спутниковые наблюдения).

Для решения задач оперативного обнаружения и идентификации атмосферного аэрозоля одними из наиболее эффективных являются оптические методы на основе лазерного зондирования, которые позволяют проводить оперативный мониторинг больших территорий бесконтактно, с высоким пространственным разрешением.

В работе показаны результаты лидарных исследований особенностей вертикальной структуры распределения аэрозоля в атмосфере горной котловины озера Байкал, как в естественных (фоновых) условиях, так и при наличии источников дымов от лесных пожаров. Эксперименты проводились ежегодно в летний период, в прибрежной зоне южной части озера Байкал, на полигоне стационара Боярский Института физического материаловедения СО РАН (51,84° с.ш., 106,06° в.д.). В экспериментах использовались технические возможности малогабаритного аэрозольно-рамановского лидара «ЛЮЗА-М2», с двумя длинами волн импульсного излучения лазера  $\lambda_1=1064$  нм и  $\lambda_2=532$  нм [4]. Обратное рассеянное атмосферой излучение попеременно принимается двумя приемными объективами для ближней и дальней зон. Основной приемный телескоп системы Кассегрена имеет диаметр зеркала 250 мм, фокусное расстояние 1 м и используется для приема излучения из дальней зоны, а внеосевая парабола с диаметром 50 мм и фокусом 200 мм – из ближней зоны на дальности до 1,5 км. При обработке полученных лидарных данных, сигналы от ближней и дальней зон «сшиваются», что позволяет расширить высотный диапазон измерений (0,1÷15 км). Прием упругого обратно рассеянного излучения на используемых длинах волн осуществлялся в аналоговом режиме, а на смещенной длине волны  $\lambda_3=607$  нм спонтанного комбинационного рассеяния – в режиме счета фотонов. В качестве приемников для каналов 532 нм и 607 нм используется фотодетекторы фирмы

Namamatsu (Япония), а для канала 1064 нм – фотомодуль на основе лавинного фотодиода собственной разработки. Если позволяют погодные условия, измерения осуществляются круглосуточно. Первичный анализ проводится на основе полученных с помощью лидара изображений пространственной структуры аэрозоля в атмосфере.

Территория Байкальского региона располагается на широте резко континентального климата, с холодными продолжительными зимами и относительно теплым летним периодом [5]. Циркуляции воздушных масс в атмосфере характеризуются в зимний период установлением высокого атмосферного давления (азиатского антициклона) с ясной солнечной, морозной погодой и развитием процессов выхолаживания (инверсий температур). В летний период года наблюдается усиление циклонической деятельности с поступлением с запада континентальных и атлантических воздушных масс, приносящих основное количество атмосферных осадков. С юга и юго-запада приходят центрально-азиатские континентальные сухие и теплые воздушные массы. Во второй половине лета, отмечается активизация южных циклонов, приносящих влажные воздушные массы через северную Монголию. При формировании местных ветровых условий над Байкалом определяющими является орографические факторы данного региона. За счет окружающего озера со всех сторон сложного горного рельефа, с множеством ущелий и межгорных котловин, здесь наблюдаются такие локальные ветра как Сарма, Баргузин, Верховик и Култук, которые оказывают влияние на пространственное распределение и перенос атмосферного аэрозоля над акваторией озера. Благодаря большому запасу воды, температура поверхности озера мало изменяется в течение суток и, соответственно, оказывает слабое воздействие на нижнюю часть пограничного слоя.

Из-за указанных выше специфических особенностей, циркуляции воздушных потоков в горной котловине, в которой расположено озеро Байкал, пространственное распределение аэрозоля в атмосфере в летний период характеризуется рядом особенностей, которые изучались в ходе многолетних лидарных наблюдений [6-8].

В качестве примера ниже рассмотрены различные атмосферные ситуации, наблюдавшиеся с использованием лидара ЛОЗА-М2, в ходе летней экспедиции в 2019 г.

На рисунке 1 приведено наличие сложной вертикальной структуры аэрозоля в фоновых летних условиях, когда наблюдается многослойное разделение в распределении содержания аэрозоля в области высот 0–3000 м. В высотной стратификации выделяются следующие диапазоны: 0–400, 400–500, 500–1000, 1000–1500, 500–2000 м и 2500–3500 м. Как видно аэрозольное заполнение на высоте 2000 м после рассвета приводит к появлению облачных образований. Высота планетарного пограничного слоя 3500 м. Более того, в условиях высокого температурного контраста между водной поверхностью Байкала и сушей не происходит обычного подъема аэрозоля в вышележащие слои в результате действия конвективных потоков. Поэтому наблюдаемая слоистая структура сохраняется длительное время и, после полудня, в результате действия бризовой циркуляции аэрозоль может наоборот, опускаться к земле, «придавленный» холодным воздухом с атмосферы над озером. Подобные картины вертикального распределения аэрозоля в атмосфере наблюдаются в каждой экспедиции.

Повышение концентрации аэрозоля в тропосфере регистрировалось 30-31 июля 2019 г., когда занос воздушных масс в Байкальский регион осуществлялся со стороны Иркутской области и Красноярского края, где по данным спутникового мониторинга отмечалось большое количество очагов лесных пожаров. 31 июля 2019 г. (рисунок 2) сформировался устойчивый пограничный слой, с практически однородным заполнением дымовым аэрозолем до высот 5000 м. Постепенно, дымовые примеси начинают осаждаться на поверхность озера, тем самым загрязняя ее.

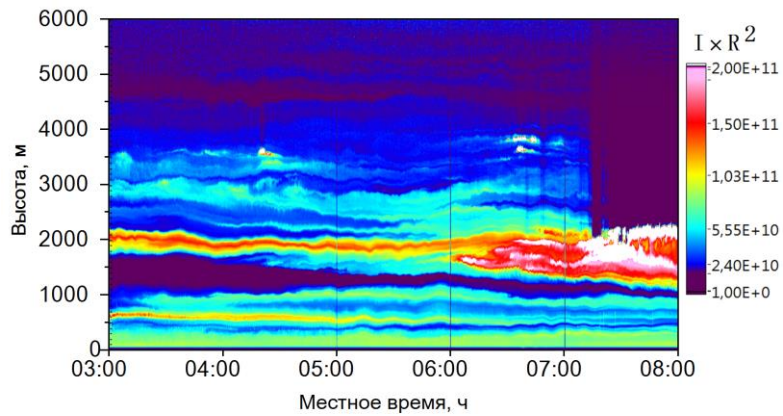


Рисунок 1. Изображение пространственно-временной структуры атмосферного аэрозоля 2 августа 2019 г. в фоновых условиях наблюдений. Шкала справа от рисунка обозначает величину лидарного сигнала, скорректированного на квадрат расстояния.

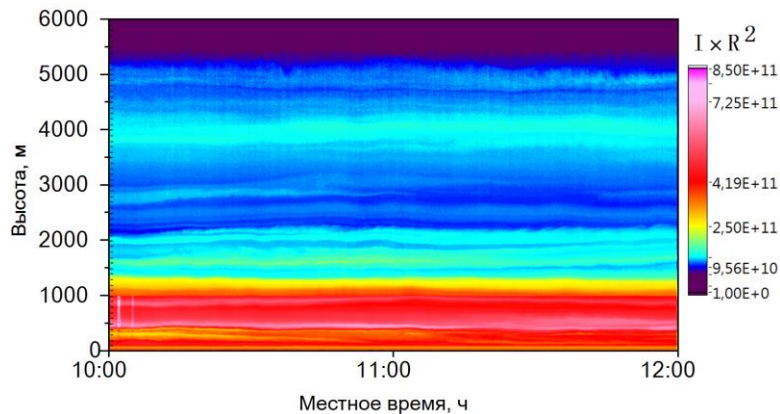


Рисунок 2. Изображение пространственно-временной структуры атмосферного аэрозоля 31 июля 2019 г. в условиях наличия многочисленных очагов лесных пожаров в Сибири. Шкала справа от рисунка обозначает величину лидарного сигнала, скорректированного на квадрат расстояния.

Случай приведенный на рисунке 3 интересен тем, что на высоте 500 м (между аэрозольными слоями) на границе слоя перемешивания наблюдалось струйное течение. Направление ветра в этот период наблюдений было юго-западное (вдоль озера). Вертикальная составляющая скорости ветра уменьшалась с 3 м/с до 1,5 м/с. Однако, после 21:00 в приземном слое значение вертикальной скорости начинает возрастать (с 2 м/с до 5 м/с). Происходит резкий подъем аэрозоля слоя перемешивания вверх, до высоты 700 м. В 21:20 начался дождь, и эксперимент пришлось временно приостановить. Такие структуры в пограничном слое атмосферы прибрежной зоны Байкала регистрируются регулярно [9].

Таким образом, в работе представлены некоторые результаты экспериментальных исследований атмосферы в летний период в прибрежной зоне южной части озера Байкал, на основе лидарных методов. Измерения проводились с использованием аэрозольно-рамановского лидара «ЛЮЗА-М2». Проведен анализ полученных данных, с целью изучения и выявления физических механизмов формирования пространственной структуры атмосферного аэрозоля над Байкалом в различных условиях наблюдений.



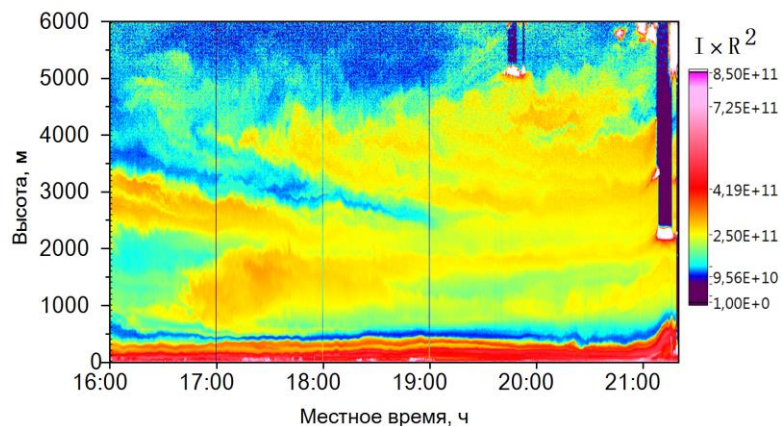


Рисунок 3. Изображение пространственно-временной структуры атмосферного аэрозоля 3 августа 2019 г. при наличии струйного течения в пограничном слое. Шкала справа от рисунка обозначает величину лидарного сигнала, скорректированного на квадрат расстояния.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института физического материаловедения СО РАН (г. Улан-Удэ), за помощь в организации и проведении экспедиций на озеро Байкал.

Обработка и анализ данных проводились в рамках проекта Российского научного фонда (РНФ) № 22-77-10043.

1. Кондратьев К.Я. От нано - до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействия атмосферного аэрозоля. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие и климат // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т.18. №7. – С. 535-556.

2. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России // Под общей ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012, 484 с.

3. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

4. Balin Yu.S., Bairashin G.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E. and Samoilova S.V. LOSA-M2 aerosol Raman lidar // Quantum Electron+. 2011. V. 41, N 10. P. 945. DOI: 10.1070/QE2011v041n10ABEH014574.

5. Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение: учебное пособие. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. 291 с.

6. Popovicheva O., Molozhnikova E., Nasonov S., Potemkin V., Penner I., Klemasheva M., Marinaite I., Golobokova L., Vratolis S., Eleftheriadis K., and Khodzer T. Industrial and wildfire aerosol pollution over world heritage Lake Baikal // Journal of Environmental Sciences. 2021. V. 107, PP 49-64. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.011>.

7. Khodzher T.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Dement'eva A.L., Tsydyrov V.V., Balin Yu.S., Penner I.E., Kokhanenko G.P., Nasonov S.V., Klemasheva M.G., Golobokova L.P., Potemkin V.L. Ship-based studies of aerosol-gas admixtures over Lake Baikal basin in summer 2018. Atmos. Ocean. Opt. 2019. Vol. 32. №04. PP. 434-441. <https://doi.org/10.1134/S1024856019040067>.

8. Nasonov S, Balin Y, Klemasheva M, Kokhanenko G, Novoselov M, Penner I. Study of Atmospheric Aerosol in the Baikal Mountain Basin with Shipborne and Ground-Based Lidars // Remote sensing. 2023; 15(15):3816; <https://doi.org/10.3390/rs15153816>.

9. Банах В. А., Смалихо И. Н., Фалиц А. В. Оценивание скорости диссипации турбулентной энергии в пограничном слое атмосферы из измерений радиальной скорости ветра микроимпульсными когерентными доплеровскими лидарами. II. Эксперимент // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 08. С. 638–643. DOI: 10.15372/AOO20170802.

## ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ И ФОРМИРОВАНИЯ БАНКОВ ДАННЫХ ПЛОЩАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА ОСАДКОВ, ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ПО РЯДУ ПАРАМЕТРОВ

*Немировская Л.Г.*

Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, г. Новосибирск, [nemirov@sibnigmi.ru](mailto:nemirov@sibnigmi.ru), [otg@sibnigmi.ru](mailto:otg@sibnigmi.ru)

В условиях современного изменения климата и возможного увеличения числа неблагоприятных и опасных гидрометеорологических явлений целесообразно и актуально расширение ареала изучаемых характеристик и спектра параметров как индикаторов климатических изменений, применение недостаточно использовавшихся ранее (при этом более детализированных их показателей).

В СибНИГМИ, поэтому, с начала 2000-х, а «вплотную» – с 2007 г. для юго-востока Западной Сибири (ранее – для Уральского региона) выполняются исследования региональных проявлений изменений климата на примере оценки условий увлажнения с помощью параметра – характеристик непрерывных периодов наличия и отсутствия осадков, определённых по нескольким критериям изучаемого явления – (от близких к стандартам Климсправочника («обобщённый» критерий) до специально смоделированных (модифицированных) авторами исследования («специальный» критерий), что актуально ввиду фактора непрерывности периодов, а, следовательно, возможного возникновения опасных и неблагоприятных гидрометеорологических явлений.

В результате получены (к 2019 г. – началу 2020 г.) по 61 станции ЗСУГМС ряд Банков данных: а) «Банки данных периодов наличия осадков определённых по «обобщённому» критерию (так называемые «Дождливые» периоды)», б) Банки данных периодов «недостаточного» увлажнения (определённых по «специальному» критерию).

Получены также «Банки данных площадных» характеристик указанных изучаемых периодов (процент одновременного охвата изучаемыми периодами определённого числа станций): а) периодов наличия осадков, б) периодов «без осадков» («обобщённый» критерий, в) «недостаточного» увлажнения («специальный» критерий).

Все полученные ранее и указанные выше «Банки данных», пополнены значениями входящих в них параметров по 2021–2022 гг. и размещены на сайте ФГБУ «СибНИГМИ» (<http://sibnigmi.ru>) в разделе «Продукция».

С 2020 г. исследование выполняется с формулировкой: «Банки данных характеристик периодов неблагоприятных гидрометеоусловий (режима осадков, температурно-влажностных и др.), показатели оценки изменчивости их пространственно-временной структуры и формирующих их циркуляционных условий – для изучения оценки на их примере изменения климата в региональном аспекте, для улучшения гидрометеобеспечения на юго-востоке Западной Сибири».

Макеты таблиц указанных массивов (Банков данных...) содержат осреднённые за каждый период метеорологические характеристики режима осадков разного знака. С учетом формулировки исследования, (приведённой выше), необходима поэтому более детализованная оценка температурно-влажностных условий изучаемых периодов режима осадков. Представилось целесообразным дополнить полученные (указанные ранее) «Банки данных...» значениями показателей температурно-влажностного режима, рассчитанными по дифференцированным (ежедневным данным). Использован для этого показатель ГТК Селянинова, количественно характеризующий степень увлажнённости, засушливости во время сезона активной вегетации. Он является, по мнению ряда авторов, достаточно обоснованным показателем влагообеспеченности в тёплом периоде года для агроэкосистем при естественном увлажнении, и используется в агроклиматологии для



общей оценки климата и выделения зон различного уровня влагообеспеченности, для оценки пожароопасности в определённых регионах.

На основе указанных ранее, в начале статьи «Банках данных...» созданы в 2020 г. (подробно об их создании написано в работах автора [1, 2 и др.], «Банки данных периодов наличия, недостаточного увлажнения, дополненные расчётом значений показателей ГТК». Для напомнимания, приводим пример в таблице 1.

**Таблица 1. Банк данных характеристик наличия осадков (определённых по «обобщённому» критерию), дополненных расчётом значений показателей ГТК (фрагмент).**

стан-ция	дата			Длит. периода осадков	сумма осадков за период	сумма температур за период	Температура Воздуха		Относ. миним. влажность	Скорость ветра		ГТК
	год	начало	конец				сред-няя	мак-сим.		сред-няя	мак-сим.	
Томск	2018	3,06	6,06	4	6,3	55,6	13,9	20,5	47	1,2	8,8	1,1
		10,06	11,06	2	14,3	33	16,5	23,1	65,5	0,9	6,5	4,3

Указанные выше «Банки данных...» подготовлены и размещены на компьютерах лаборатории и планируется их разместить на сайте СибНИГМИ (<http://sibnigmi.ru>).

Как видно из формулировки проекта одна из основных задач исследования – анализ характеристик изучаемых периодов в соответствии с особенностями формирующих их атмосферных процессов разного масштаба – для выявления условий их возможного формирования, а, следовательно – для получения возможных заблаговременных сведений об их наличии.

Значительное внимание поэтому на данном этапе исследования сосредоточено на разработке подхода к идентификации, а соответственно и к отбору существенно характерных и экстремальных изучаемых периодов, то есть наиболее информативных в связи с вышеуказанной задачей, учитывая: а) возможное увеличение (в условиях современного изменения климата) числа экстремальных гидрометеорологических явлений, неблагоприятных для отраслей хозяйственной деятельности, экологии и т.д., б) специфику используемого основного параметра – непрерывных периодов режима осадков – ввиду фактора их непрерывности возможно возникновение опасных и неблагоприятных гидрометусловий, в) целесообразность, в первую очередь рассмотрения существенно экстремальных периодов для изучения их связи с формирующими их атмосферными процессами.

Поэтому логика исследования привела нас к использованию разработанных и полученных ранее в данном исследовании «площадных» характеристик изучаемых периодов, иллюстрирующих степень распространённости изучаемых периодов одновременно по числу станций (территории), что является адекватным показателем их «экстремальности», репрезентативным для рассмотрения (в эти даты) атмосферных процессов.

Полученный ранее «Банк данных «площадных» характеристик...» получен в двух форматах – «суммарном» (более или равно определённого порогового значения охвата территории в процентах), и «конкретном», формат, названный в работе «суммарным», оказался более адекватным для данной задачи. Разработан поэтому специально алгоритм расчета «охвата» числа станций за каждый день изучаемых периодов «охвата», т.е. в ежедневном масштабе.

Наряду с этим, для «многосторонней» характеристики «экстремальности» изучаемых периодов целесообразно использовать показатель ГТК, как параметр достаточно обоснованно характеризующий влагообеспеченность в сезон активной вегетации (особенно для «дождливых» периодов, показатель ГТК в данной работе используется также и для периодов недостаточного увлажнения, согласно критерию, допускающему определенное количество осадков). Значения ГТК содержатся в полученном в исследовании в

2020 г. «Банках данных...» [1], сформированных по станциям. Для получения значений ГТК осредненно по территории для каждого периода, охватывающего определённое число станций, разработан специально способ, (а соответственно и алгоритм) расчета «площадных» значений ГТК каждого периода «охвата». Пороговые значения длительностей охватов и ГТК определены на основе расчета их повторяемостей (пример в табл. 2).

**Таблица 2. Повторяемость значений длительностей каждого периода охвата при разных площадях одновременного охвата числа станций региона ЗСУГМС (пример).**

Площадь одновременного охвата (% числа станций)	Градации длительности "охватов" периодов недостаточного увлажнения (дни)									
	1	2-4	5-8	9-12	13-17	18-20	21-24	25-28	29-30	∑ (%)
≥ 50 %	8,2	16,7	16,2	30,0	14,9	7,3	3,2	1,3	0,9	100,0
≥ 75 %	6,9	18,1	20,8	29,2	18,1	4,2	1,4	1,4	0,0	100,0

Разработана, таким образом, методика, которая основывается на «многофакторном» подходе к идентификации и отбору наиболее информативных (экстремальных) периодов для последующего изучения формирующих их атмосферных процессов.

Сформированы: I. Банки данных «площадных» характеристик периодов наличия осадков («дождливых» периодов): 1) охватывающих а) ≥50% станций, б) ≥75% станций, 2) при длительности одновременного охвата: а) ≥ 2 дней, б) ≥ 3 дней; 3) при значениях ГТК, осреднённых за период охвата ≥ 1,4.

II. Банки данных «площадных» характеристик периодов недостаточного увлажнения: 1) охватывающих одновременно: а) ≥50% станций, б) ≥75% станций, 2) при длительности одновременного охвата а) ≥ 5 дней, б) ≥ 10 дней (учитывая изначальную, по станциям, существенную длительность периодов, определённых по «специальному» критерию), при значениях ГТК не более примерно ± 0,2.

В таблицах 3-5 представлены для примера фрагменты указанных «Банков...».

**Таблица 3. Банк данных характеристик периодов наличия осадков, экстремальных по ряду параметров: 1) при охвате ими ≥ 50 % станций ЗСУГМС (Западно-Сибирского Управления), 2) при длительности «охвата» охвата ≥ 3 дней, дополненных расчётами значений а) процент охвата за каждый день периода, б) ГТК за каждый период «охвата» (фрагмент для примера).**

год	месяц	дата периода «охвата»	длительность «охвата»	ГТК (средний по территории каждого периода охвата)	Проценты (%) охвата по дням каждого периода								
2019	5	21-23	3	6,3	86	55	75						
2019	6	7-9	3	2,9	84	91	85						
2019	6	13-19	7	4,2	53	80	64	75	69	62	86		

**Таблица 4. Банк данных характеристик периодов наличия осадков, экстремальных по ряду параметров: 1) при охвате ими ≥ 75 % станций ЗСУГМС (Западно-Сибирского Управления), 2) при длительности «охвата» охвата ≥ 3 дней, дополненных расчётами значений а) процент охвата за каждый день периода, б) ГТК за каждый период «охвата» (фрагмент для примера).**

год	месяц	дата периода «охвата»	длительность «охвата»	ГТК (средний по территории каждого периода охвата)	Проценты (%) охвата по дням каждого периода								
2007	5	8-10	3	3,6	81	93	77						
2007	5	22-24	3	7,7	75	82	94						
2009	6	24-27	4	2,5	79	98	83	80					

**Таблица 5. Банк данных площадных характеристик периодов недостаточного увлажнения, экстремальных по ряду параметров: 1) при охвате ими  $\geq 75\%$  станций ЗСУГМС (Западно-Сибирского Управления), 2) при длительности «охвата»  $\geq 10$  дней, дополненных расчётами значений а) процент охвата за каждый день периода, б) ГТК за каждый период «охвата» (фрагмент для примера).**

год	месяц	дата периода «охвата»	длительность «охвата»	ГТК (средний по территории каждого периода охвата)	Проценты (%) охвата по дням каждого периода												
					91	91	91	90	88	88	90	90	88	81	81		
1977	6	1-11	11	0,08	91	91	91	90	88	88	90	90	88	81	81		
1978	9	15-24	10	0,2	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76			

Подготовленные «Банки данных «площадных» характеристик изучаемых периодов экстремальных по ряду параметров» сформированы: а) для территории ЗСУГМС в целом, б) для территорий каждой из областей, входящих в ЗСУГМС, планируются к размещению на сайте СибНИГМИ (<http://sibnigmi.ru>).

Полученные «Банки данных являются основой для подготовки «Календарей дат изучаемых периодов для рассмотрения особенностей атмосферных процессов в периоды: а) недостаточного увлажнения, б) в периоды наличия осадков («дождливые» периоды). Подготовлен алгоритм для формирования указанных «Календарей дат...» основанной на поэтапном включении в него периодов с определёнными («разработанными») пороговыми значениями: а) их распространения по территории, с учетом процентов охвата по дням, б) длительностей «охватов», в) значений ГТК (средних для территории каждого периода). Подготовлена первая очередь «Календарей дат...» (табл. 6), разработана предварительная схема фиксации синпроцессов.

**Таблица 6. Календарь дат (предв.) периодов недостаточного увлажнения подготовленный на основе «Банка данных площадных характеристик периодов», экстремальных по ряду параметров, с учетом разных критериев длительности периодов и охвата территории), – для рассмотрения в эти даты атмосферных процессов (фрагмент для примера).**

год	месяц	дата охвата	длительность охвата	ГТК за каждый охват	Проценты охвата по дням каждого периода																		
					85	80	74	72	69	80	80	80	80	80	77	74	74	74	69				
1998	8	1-15	15	0,22	85	80	74	72	69	80	80	80	80	80	77	74	74	74	69				
2002	5	1-9	9	0,23	95	95	95	95	95	90	85	80	74										

1. Немировская Л.Г. Создание банков данных характеристик периодов режима осадков, дополненных показателями температурно-влажностных условий, для оценки на их примере изменения регионального климата и улучшения гидрометобеспечения юго-востока Западной Сибири // Четырнадцатое Сибирское совещание и школа молодых ученых по климато-экологическому мониторингу: Тезисы докладов российской конференции с международным участием / Под ред. Е.А. Головацкой. - Томск, 19-22 октября 2021 г., с. 39-41.

2. Методика анализа характеристик изучаемых периодов в соответствии с особенностями формирующих их атмосферных процессов – на основе разработанной методики определения и отбора существенно информативных периодов: Отчет о НИР (промежут.). – Шифр темы 2.6. – Отв. исп. Немировская Л.Г. – Новосибирск, 2022. – 38 с. - Рег № НИОКТР АААА-А20-120121990024-4. – Рег. № ИКРБС 223020202279-1.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ НЕВОЗМУЩЁННОГО ПРИЗЕМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В Г. ТОМСКЕ И В ПУНКТАХ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ЮГЕ СИБИРИ

Пустовалов К.Н.<sup>1,2</sup>, Нагорский П.М.<sup>1</sup>, Оглезнева М.В.<sup>1</sup>, Сам А.А.<sup>1</sup>, Смирнов С.В.<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Томский государственный университет, const.pv@yandex.ru, npm\_sta@mail.ru,  
oglezneva.m@yandex.ru, artysh.sat@gmail.com, smirnov@imces.ru

Измерения основных атмосферно-электрических величин в приземном слое дают информацию как о состоянии и изменчивости атмосферного электрического поля *in situ*, так и о функционировании всей глобальной электрической цепи (ГЭЦ) [1–3]. Средняя суточная вариация электрического поля (унитарная вариация), которая соответствует универсальному времени и не зависит от места измерения, представляет собой глобальный ежедневный вклад электрической активности в районах нарушенной погоды [4]. При этом вклад региональных и локальных факторов может существенно влиять на изменчивость атмосферно-электрических величин [5–12]. Поскольку электрическое состояние атмосферы может сильно варьироваться из-за различных факторов, для изучения функционирования ГЭЦ необходим мониторинг и анализ изменчивости атмосферно-электрических величин в различных регионах Земли [13].

Изменчивость атмосферно-электрических величин в Азиатской части России на сегодняшний день остаётся слабо изученной. На территории Сибири регулярные наблюдения за параметрами атмосферного электричества проводятся всего в 3 пунктах атмосферно-электрической сети Росгидромет (г. Иркутск, г. Диксон и г. Тикси) и в нескольких пунктах наблюдений институтов СО РАН (г. Томск, г. Якутск, г. Нерюнгри, и др.). Данные пункты мониторинга атмосферно-электрических величин расположены, главным образом, на равнинных территориях и побережьях морей. Кроме того, они находятся вблизи населённых пунктов. Наименее изученными остаются горные районы континентальных частей Сибири, имеющие сложный рельеф и геологическое строение, а также включающие различные природные зоны и типы ландшафтов. Организация пунктов регулярных наблюдений на этих территориях сопряжена с рядом трудностей из-за их труднодоступности и малонаселённости. В связи с этим, основным способом их изучения остаются экспедиционные наблюдения.

Целью данной работы – сравнительный анализ изменчивости невозмущённого электрического поля в электрических невозмущённых атмосферных условиях (условиях «хорошей погоды») в селитебном (на примере г. Томске) и природных (в пунктах экспедиционных наблюдений) ландшафтах на юге Сибири.

Исследование основано на данных измерений градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\varphi$ ) в г. Томске, а также в пунктах экспедиционных измерений. В г. Томске (табл. 1, пункт 1) непрерывные измерения  $\nabla\varphi$  с 2006 г по настоящее время выполняются в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (ГО ИМКЭС) [12]. В исследование были использованы данные измерений  $\nabla\varphi$  в ГО ИМКЭС за летние месяцы 2006–2020 г. Экспедиционные измерения проводились эпизодически в шести пунктах наблюдений (табл. 1, пункты 2–8) на территории Бурятии, Хакасии и Тывы в летние месяцы 2020–2022 гг. Пункт наблюдения 2 был расположен в урочище Красная сопка, расположенном в Июско-Ширинской степи на водоразделе озёр Белё и Тус. Пункт наблюдения 3 был размещён в урочище Баян-Тала, представляющем собой сухую степь, расположенную в предгорье хр. Восточный Танну-Ола. Пункт наблюдения 4 находился в урочище

Шоль, представленном полупустынным ландшафтом и расположенном в центре Центрально-Тувинской котловины. Пункт наблюдения 5 располагался на высокогорном плато, представленном горной тундрой и альпийскими лугами, вблизи горного массива Монгун-Тайга и оз. Хиндиктиг-Холь. Пункты наблюдения 5–7 были расположены в юго-западной части Байкальской рифтовой зоны, которая представляет собой серию котловин, ограниченную с юга и севера хребтами Хамар-Дабан и Тункинские гольцы, соответственно. При этом пункт 5 находился в центральной части Тункинской котловины, пункт 6 – на отроге хребта Тункинские гольцы (южном склоне), а пункт 7 – в западной части Мондинской котловины в долине р. Иркут (в верхнем течение). Кроме измерений  $\nabla\varphi$  в каждом из пунктов также производились синхронные измерения метеорологических величин, характеристик естественного радиационного фона и содержания аэрозоля в воздухе.

**Таблица 1. Расположение пунктов наблюдений.**

№	Район наблюдений	Широта, ° с. ш.	Долгота, ° в. д.	Высота н. у. м., м
1	ГО ИМКЭС (Томская обл., г. Томск)	56,5	85,1	170
2	Урочище Красная Сопка (Хакасия)	54,7	90,0	540
3	Урочище Шоль (Тыва)	51,5	94,4	910
4	Урочище Баян-Тала (Тыва)	51,1	93,5	1030
5	Массив Монгун-Тайга (Тыва)	50,4	90,0	2490
6	Тункинская котловина (Бурятия)	51,8	102,6	770
7	Тункинские гольцы (Бурятия)	52,0	102,4	1440
8	Мондинская котловина (Бурятия)	51,7	100,9	1380

Обработка и анализ экспериментальных данных, полученном в каждом пункте, заключались в отборе вариаций  $\nabla\varphi$ , соответствующих условиям «хорошей» погоды, и их дескриптивном анализе. Кроме того проводился анализ суточных вариаций  $\nabla\varphi$  в пунктах наблюдений и корреляционно-регрессионный анализ их связи.

Рассмотрим основные полученные результаты. Согласно рисунку 1, в ГО ИМКЭС (пункт 1) средние (медианные) значения  $\nabla\varphi$  более чем в 2 раза, а их размах более чем в 3 раза выше чем в пунктах экспедиционных наблюдений (пункты 2–8).

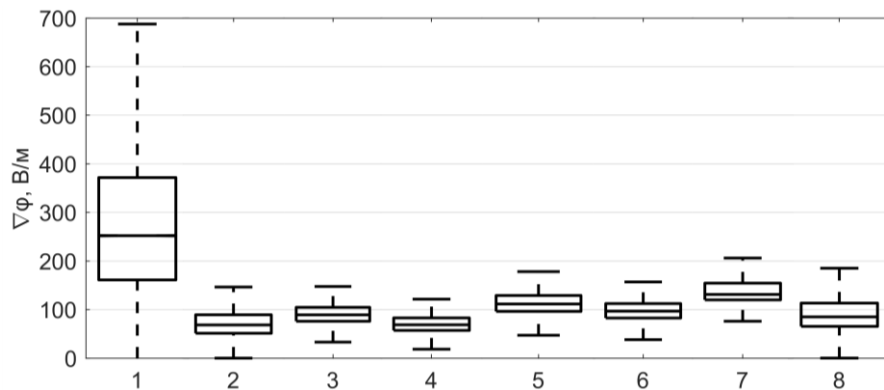


Рисунок 1. Квантильные диаграммы (Box-plot) для изменчивости  $\nabla\varphi$  в пунктах наблюдений (см. табл. 1, пункты 1–8).

Отмеченная выше особенность объясняется более высокой запылённостью воздуха в селитебном ландшафте (г. Томск) по сравнению с природными степными и горными ландшафтами. Так, среднее содержание в приземном слое аэрозольных частиц менее 2,5 мкм ( $PM_{2.5}$ ) в пункте 1 в 1,5–3 раза выше чем в пунктах наблюдений 3–5.

Несмотря на сильное различие средних значений, суточные вариации  $\nabla\varphi$  в ГО ИМКЭС и других пунктах наблюдений имеют качественное сходство (Рис. 2). Как и в ГО ИМКЭС в большинстве экспедиционных пунктов минимальные значения  $\nabla\varphi$  отмечаются утром во время рассвета (5–7 ч). При этом перед рассветом отмечаются повышенные значения  $\nabla\varphi$ . Максимальные значения  $\nabla\varphi$  во всех пунктах отмечаются в послеполуденные и вечерние часы, однако время достижения наибольших значений существенно различается. В период интенсивного прогрева подстилающей поверхности и приземного слоя воздуха (~ 09–11 ч) во всех пунктах отмечается быстрое возрастание  $\nabla\varphi$  и возникновение вторичного максимума или «плеча», обусловленное конвективным генератором [6]. В пунктах 2, 4 и 8 в утренние и/или вечерние часы дополнительно регистрируются быстрые возрастания  $\nabla\varphi$ , не зарегистрированные в ГО ИМКЭС и других пунктах наблюдений и, предположительно, связанные с образованием радиационных туманов.

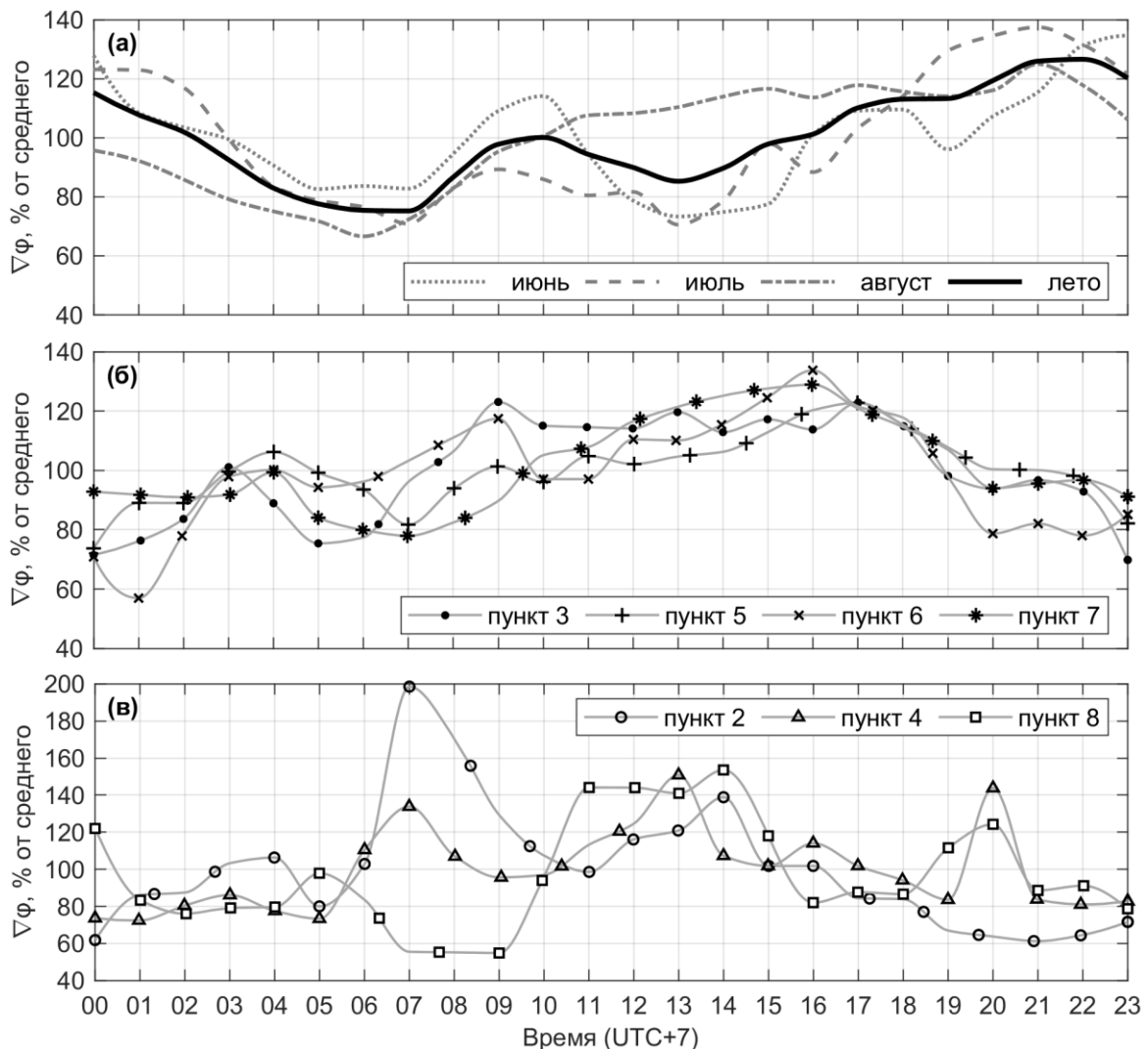


Рисунок 2. Сглаженные вариации нормированных относительно среднего значений  $\nabla\varphi$  в пунктах наблюдений: а) пункт 1 (июнь, июль, август, среднее за лето); б) пункты 3, 5, 6 и 7; в) пункты 2, 4 и 8.

В целом, суточный ход  $\nabla\varphi$  в ГО ИМКЭС и пунктах экспедиционных наблюдений в летние месяцы может быть отнесён к континентальному типу с двумя максимумами и минимумами [2, 3, 11]. Суточный ход  $\nabla\varphi$  в ГО ИМКЭС, в особенности в дневное время, в целом согласуется с суточным ходом  $\nabla\varphi$  в пунктах экспедиционных наблюдений, расположенных в степных и горных ландшафтах. Наилучшее согласие отмечается с пунктами 3, 5, 6 и 7. При этом данные пункты расположены в различных частях Южной Сибири, часовых поясах, ландшафтах и формах рельефа, а расстояние между ними и ГО ИМКЭС составляет около 820, 760, 1250 и 1230 км, соответственно.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-27-00482 в соответствии с требованиями, перечисленными в соглашении между РНФ, ИМКЭС СО РАН и руководителем проекта и с требованиями к конкурсной документации, (<https://www.rscf.ru/en/project/22-27-00482>).

1. Chalmers J. A. Atmospheric electricity. Oxford: Pergamon Press, 1967. 515 p.
2. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 323 с.
3. Israël H. Atmospheric Electricity. Vol 2 (Fields, charges, currents). Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1973. 365 p.
4. Harrison R.G. The Carnegie Curve // *Surveys in Geophysics*. 2013. V. 34. P. 209–232.
5. Ahmad N., Gurmani S. F., Basit A. et al. Impact of local and global factors and meteorological parameters in temporal variation of atmospheric potential gradient // *Advances in Space Research*. 2021. V. 67. P. 2491–2503.
6. Anisimov S. V. Electricity of the convective atmospheric boundary layer: field observations and numerical simulation / S. V. Anisimov, S. V. Galichenko, N. M. Shikhova, K. V. Afinogenov // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. P. 390–398.
7. Adzhiev A. K., Kupovykh G. V. Measurements of the Atmospheric Electric Field under High-Mountain Conditions in the Vicinity of Mt. Elbrus // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2015. V. 51. P. 633–638.
8. Bennett A. J., Harrison R. G. Variability in surface atmospheric electric field measurements // *Journal of Physics: Conference Series*. 2008. V. 142. P. 012046.
9. Pustovalov K. N., Nagorskiy P. M., Oglezneva M. V., Smirnov S. V. The Electric Field of the Undisturbed Atmosphere in the South of Western Siberia: A Case Study on Tomsk // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 614.
10. Tacza J., Raulin J.-P., Morales C. et al. Analysis of long-term potential gradient variations measured in the Argentinian Andes // *Atmospheric Research*. 2021. V. 248. P. 105200.
11. Yaniv R. Local and global impacts on the fair-weather electric field in Israel / R. Yaniv, Y. Yair, C. Price, Sh. Katz // *Atmospheric Research*. 2016. V. 172–173. P. 119–125.
12. Торопов А. А., Козлов В. И., Каримов Р. Р. Вариации атмосферного электрического поля по наблюдениям в Якутске // *Наука и образование*. 2016. № 2 (82). С. 58–65.
13. Nicoll K. A., Harrison R. G., Barta V. et al. A global atmospheric electricity monitoring network for climate and geophysical research // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V.184. P. 18–29.

## КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ РОССИИ

*Стыценко Ф.В., Барталев С.А.*

Институт космических исследований РАН, г. Москва, fedor@d902.iki.rssi.ru

Пожары являются наиболее мощным фактором деструктивного воздействия на леса России, при этом многие исследователи отмечают выраженные тенденции нарастания площади их пирогенных повреждений и гибели (Барталев и др., 2015; Пономарев и др., 2017; Харук, Пономарев, 2020). Данные дистанционного зондирования Земли являются незаменимым инструментом мониторинга лесных пожаров и позволяют исследовать особенности их географического и сезонного распределения, межгодовую изменчивость числа возникающих очагов горения и пройденной огнем площади (Лупян и др., 2017). Разработанные в последние годы методы дистанционной оценки пирогенных повреждений лесов позволили сформировать ежегодно обновляемые многолетние ряды данных о характеристиках их постпожарных усыханий и гибели в масштабах страны (Стыценко и др., 2013).

В работе представлены результаты оценки степени повреждения лесов России пожарами за период 2006–2022 гг. по данным спутниковых наблюдений среднего пространственного разрешения. Оценка выполнялась на основе анализа временных серий отражательной способности поверхности в ближнем и среднем ИК диапазонах, полученных по данным MODIS, с последующим определением показателя средневзвешенной категории состояния лесов (СКС) на основе установленного эмпирического уравнения связи (Стыценко и др., 2013). В соответствии с принятыми в лесном хозяйстве критериями, на основе дистанционно измеренных значений показателя СКС выделялись следующие категории состояния лесов: здоровые и ослабленные ( $\leq 2.5$ ), сильно ослабленное (2.5–3.5), усыхающее (3.5–4.5), погибшие ( $\geq 4.5$ ). Результат работы метода представляет собой оценку категории состояния лесов, поврежденных огнем с пространственным разрешением 230м. С учетом отсроченных во времени процессов постпожарных усыханий лесов целесообразно объединение категорий усыхающих и погибших лесов при рассмотрении летальности лесов в результате воздействия огня.

Проведенные исследования позволили установить, что площадь ежегодно погибающих от пожаров лесов России характеризуется многократной изменчивостью (Барталев и др., 2015). При этом доля погибших и усыхающих лесов в структуре пройденной огнем площади варьируется в диапазоне от 23 до 66%, а среднемноголетний показатель за указанные годы составил 50.8% (рисунок 1).

Для среднемноголетних функций распределения площади лесных пожаров в течение пожароопасного сезона характерно наличие выраженных пиков горимости в весенний и летний периоды года (Лупян и др., 2017). В то же время выявлено (рисунок 2), что вероятность пирогенной гибели лесов характеризуется выраженным сезонным распределением с достижением максимума в летний период, в то время как весенним и осенним пожарам соответствуют многократно более низкие уровни повреждений (Барталев и др., 2015, 2017).



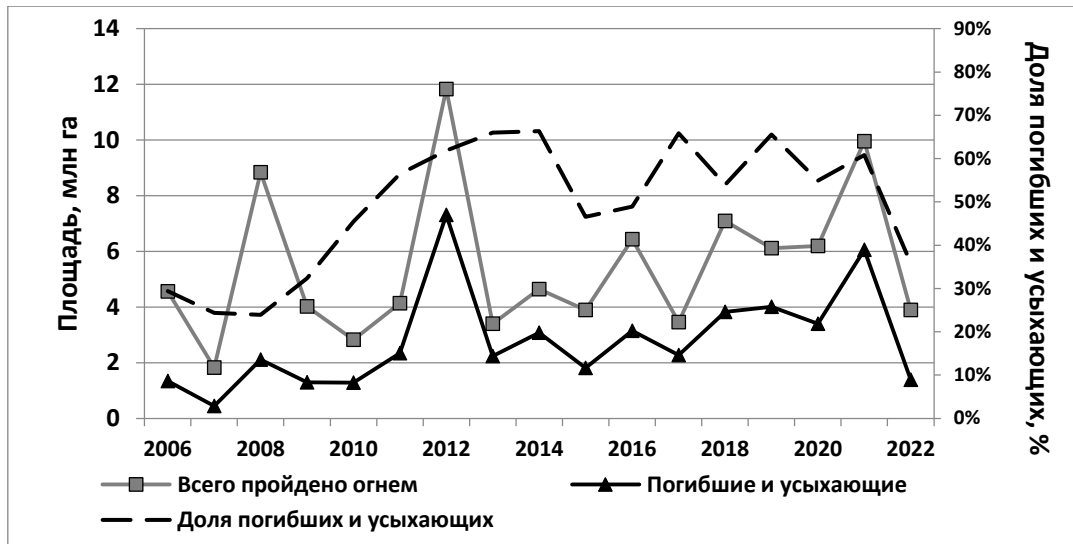


Рисунок 1. Характеристики повреждения лесов России пожарами за 2006-2022 гг.



Рисунок 2. Среднемноголетнее сезонное распределение летальности пожаров в лесах России.

Более детальный анализ сезонности лесных пожаров с учетом даты детектирования пожара для каждого пиксела позволил оценить влияние данного фактора на долю погибших и усыхающих лесов в структуре пройденной огнем площади. В общем случае ежегодная летальность лесных пожаров  $i$ -го года на уровне страны может быть получена на основе следующего выражения:

$$FL_i = MA_i \times BA_i^{-1}$$

где  $FL_i$  – показатель летальности лесных пожаров;  $BA_i$  – площадь лесных пожаров;  $MA_i$  – площадь погибших от пожаров лесов.

Выполненные исследования позволили предложить эвристический индекс сезонной летальности пожаров  $SFLI_i$  (Seasonal Fire Lethality Index), который зависит от распределения дат детектирования лесных пожаров и вычисляемый следующим образом:

$$SFLI_i = BA_i^{-1} \times \sum_t |t - t^*| \times BA_i(t)$$

где  $BA_i(t)$  – площадь лесных пожаров  $i$ -го года, действовавших в календарный день  $t$ ;  $t^*$  – кульминационный день летальности пожаров, соответствующий календарному дню 19 июля.

Предложенный индекс  $SFLI_i$  может интерпретироваться как взвешенное на площадь пожаров среднее отстояние времени их действия от кульминационного дня, а для его оперативной оценки требуется лишь информация о сезонном распределении площади лесных пожаров и предварительно установленное значение постоянной  $t^*$ .

Сопоставление значений  $SFLI_i$  и  $FL_i$  за 2006-2022 гг позволили получить уравнения связи данных показателей, а коэффициент детерминации  $R^2=0.80$ , свидетельствующим о достаточно хорошем приближении линейной зависимостью полученной взаимосвязи, что наглядно иллюстрируется рис. 5.

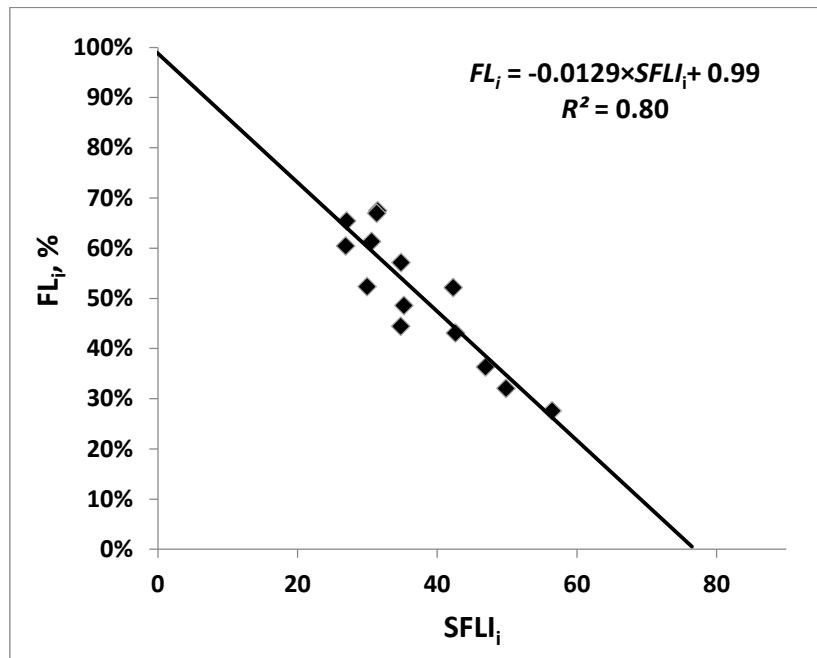


Рисунок 3. Аппроксимация линейной зависимостью взаимосвязи значений показателей летальности лесных пожаров  $SFLI_i$  и  $FL_i$ .

Из установленной зависимости следует, что теоретически при нулевом значении индекса  $SFLI_i$ , т.е. при гипотетическом действии всех пожаров в день кульминации, их совокупная летальность составит 99% или, иными словами, с высокой вероятностью приведет к практически полной гибели лесов. При этом по мере роста индекса  $SFLI_i$  величина показателя летальности лесных пожаров снижается, достигая нуля при значении  $SFLI_i = 77$  дней. Таким образом, исходя из этих оценок, можно предположить, что гибель лесов России от пожаров, действующих за пределами временного интервала от 4 мая до 4 октября, является крайне маловероятной

Обнаруженные зависимости вероятности пирогенной гибели лесов от времени возникновения и действия огня в течение сезона позволяет рассматривать фактор сезонного распределения площади пожаров в числе наиболее информативных предикторов их летальности (Барталев, Стыценко, 2021). Полученные результаты оценки степени повреждения лесов пожарами являются важным источником информации для оценки экологического ущерба, баланса углерода в лесных экосистемах России и других работ.

Исследования выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России: номер соглашения в ГИИС «Электронный бюджет» 075-15-2022-1229 «Применение технологий высокопроизводительных вычислений и больших данных для совместной разработки экономически эффективных автоматизированных методов широкомасштабного биомониторинга водно-болотных угодий. HPC and BigData applied to codesigning cost-efficient automation for large scale wetland biomonitoring» Использовалась

инфраструктура хранения и обработки спутниковых данных Центра коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2015).

1. Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Спутниковая оценка гибели древостоев от пожаров по данным о сезонном распределении пройденной огнем площади // Лесоведение. 2021. № 2. С. 115-122. DOI: 10.31857/S0024114821020029.

2. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С.83-94.

3. Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Хвостиков С.А., Лупян Е.А. Методология мониторинга и прогнозирования пирогенной гибели лесов на основе данных спутниковых наблюдений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 176-193.

4. Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Там же. 2017. Т. 14. № 6. С. 158-175.

5. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263-284.

6. Пономарев Е.И., Харук В.И., Якимов Н.Д. Результаты и перспективы спутникового мониторинга природных пожаров Сибири // Сибирский лесной журнал. 2017. № 5. С. 25–36.

7. Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 254-266.

8. Харук В.И., Пономарев Е.И. Пожары и гари сибирской тайги // Наука из первых рук. 2020. № 2 (87). С. 56-71.

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАРОВ БЕНЗОЛА И ТОЛУОЛА С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗАТОРА РТУТИ ДОГ-07

*Татур В.В., Тихомиров А.А.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
tatur@imces.ru, tikhomirov@imces.ru

Сырой природный газ (ПГ) различных газовых месторождений, а также попутный нефтяной газ могут содержать в своем составе пары ртути с концентрацией до  $4 \text{ мг/м}^3$  [1, 2]. Прокачка газа с таким количеством ртути приводит к коррозии газопроводов, а его сжигание – к загрязнению окружающей среды. Фирмой Люмекс (г. С.-Петербург) была разработана методика определения концентрации ртути  $N_{\text{Hg}}$  в природном газе с использованием анализатора ртути РА-915М с приставкой РП-91НГ [3]. Этот анализатор использует в качестве источника излучения ртутную капиллярную лампу (РКЛ), наполненную изотопом  $^{204}\text{Hg}$  при низком давлении и помещенную в постоянное магнитное поле, которое обеспечивает в продольном эффекте Зеемана (ЭЗ) расщепление резонансной линии  $\lambda_0 = 253,7 \text{ нм}$  на  $\sigma^+$ - и  $\sigma^-$ -компоненты. При определенном значении индукции магнитного поля  $B$  излучение  $\sigma^-$ -компоненты ( $\lambda_{\text{off}}$ ) выводится на край полосы поглощения смеси изотопов, содержащихся в атмосферной ртути, а излучение  $\sigma^+$ -компоненты ( $\lambda_{\text{on}}$ ) остается внутри этого контура [4]. Таким образом, реализуется методика дифференциального поглощения в анализаторе концентрации ртути  $N_{\text{Hg}}$ .

Наличие в составе ПГ различных примесных газов, таких как бензол, толуол, сероводород и других, которые имеют полосы поглощения вблизи  $\lambda_0 = 253,7 \text{ нм}$ , ограничивает чувствительность анализаторов ртути, использующих РКЛ в продольном ЭЗ [3, 4]. Это происходит вследствие того, что такие примесные газы поглощают излучение длин волн  $\lambda_{\text{on}}$  и  $\lambda_{\text{off}}$ , причем в разной степени. Особенно на работу таких анализаторов влияет присутствие в составе ПГ бензола с концентрацией более  $1 \text{ мг/м}^3$  [3]. Это связано с тем, что присутствие таких примесных газов в составе ПГ приводит к искажению значения концентрации  $N_{\text{Hg}}$ , измеряемой анализатором [5].

Как было показано нами в [5], анализаторы ртути на основе поперечного ЭЗ [6] обладают меньшей зависимостью от таких примесных газов как бензол ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) и толуол ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ ), концентрация которых в составе ПГ может составлять  $5 \div 320 \text{ мг/м}^3$  для бензола и  $3,5 \div 100 \text{ мг/м}^3$  для толуола в зависимости от месторождения ПГ.

С помощью анализатора ртути ДОГ-07 [6] проведена экспериментальная оценка влияния паров  $\text{C}_6\text{H}_6$  и  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$  на измерение концентрации  $N_{\text{Hg}}$  в такой газовой смеси [7]. Было установлено, что при добавлении паров бензола или толуола в концентрациях до  $10 \text{ мг/м}^3$  в измерительную кювету анализатора ДОГ-07, где уже находятся пары ртути в концентрации более  $30 \text{ нг/м}^3$ , ошибки в измерении концентрации  $N_{\text{Hg}}$  не наблюдаются. При этом выявлено, что добавление в измерительную кювету анализатора паров бензола всегда приводит к завышению измеренного значения  $N_{\text{Hg}}$ . Введение в кювету анализатора паров толуола различных концентраций приводило к неоднозначным значениям регистрируемых величин  $N_{\text{Hg}}$  (к дополнительному увеличению или уменьшению показаний анализатора).

Для более детальной оценки влияния паров бензола и толуола на измерения концентрации  $N_{\text{Hg}}$  на установке и по методике, описанной в [7], проведены исследования влияния этих газов на работу анализатора ДОГ-07 при плавном увеличении вводимой в кювету анализатора концентрации бензола или толуола. При этом емкость контейнера, через который в замкнутый измерительный контур установки вводились пары газов,

была уменьшена до 4 л. Результаты проведенных измерений представлены ниже.

В анализаторе ДОГ-07, использующем РКЛ с естественным изотопным составом ртути в поперечном ЭЗ, методика дифференциального поглощения реализуется за счет того, что излучения  $\sigma^+$ - и  $\sigma^-$ -компонент ( $\lambda_{off}$ ) выводятся на края полосы поглощения смеси изотопов, содержащихся в атмосферной ртути, а излучение  $\pi$ -компоненты ( $\lambda_{on}$ ) остается внутри этого контура [6]. При этом измеряемая анализатором концентрация  $N_{Hg}$  определяется по соотношению

$$N_{Hg} = K \ln(I_{\sigma}/I_{\pi}), \quad (1)$$

где  $K$  – аппаратная постоянная прибора;  $I_{\sigma}$  – интенсивности суммы  $\sigma^+$ - и  $\sigma^-$ -компонент излучения РКЛ,  $I_{\pi}$  – интенсивность излучения  $\pi$ -компоненты, которые регистрируются в анализаторе после прохождения через измерительную кювету с исследуемой газовой смесью.

На рис. 1 показаны результаты измерения паров бензола, а на рис. 2 – паров толуола. Поскольку алгоритм вычисления концентрации газа, находящегося в измерительной кювете анализатора, осуществляется по соотношению (1), то результат измерения выдается в значениях концентрации Hg ( $нг/м^3$ ).

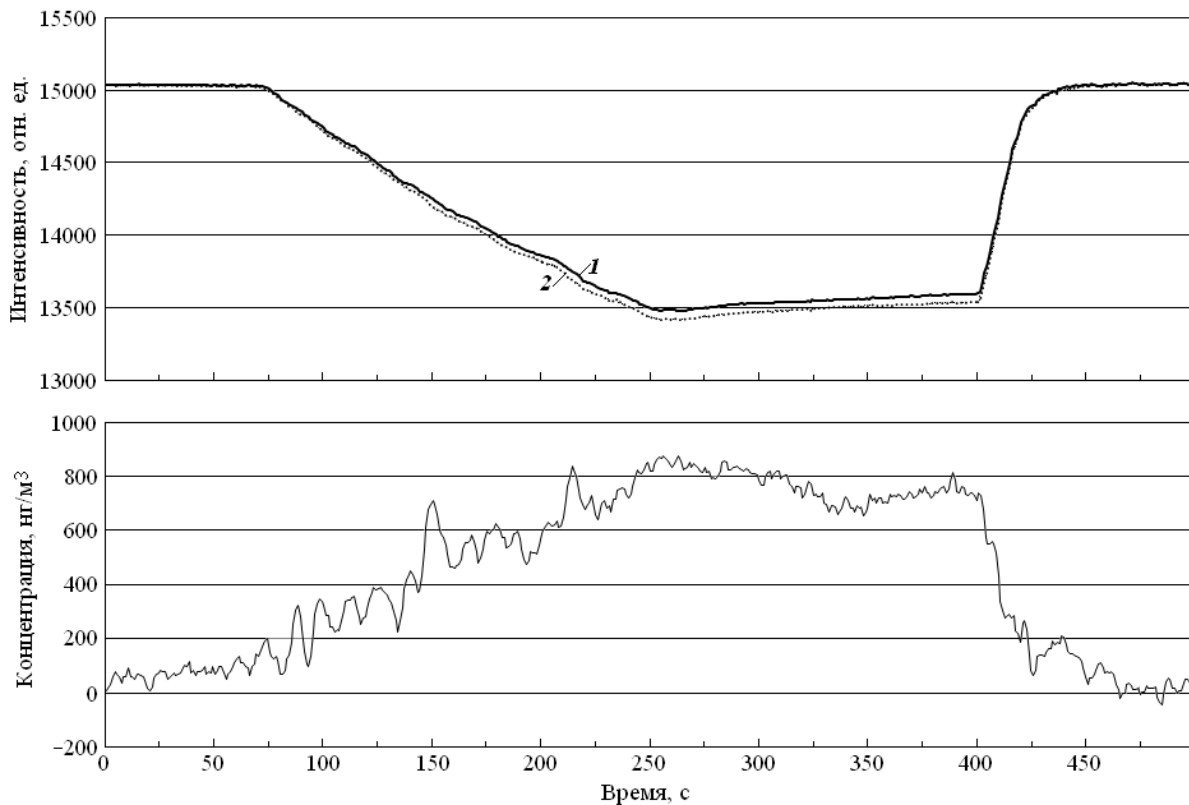


Рисунок 1. Результаты измерения концентрации бензола при плавной подаче его паров в измерительную кювету анализатора ДОГ-07.

Верхняя часть рис. 1 показывает изменения регистрируемых значений 1 -  $I_{\sigma}$  и 2 -  $I_{\pi}$  при плавном введении с помощью шприца (начиная с 50 и до 250 с) в измерительный контур установки паров бензола от 0 до 402  $нг/м^3$ , нижняя – вычисленные по соотношению (1) измеренные значения концентрации. Как видно из рисунка, последовательное увеличение вводимых порций паров бензола приводит к уменьшению измеряемых значений  $I_{\pi}$  и  $I_{\sigma}$  и, соответственно, к увеличению показаний анализатора  $N_{Hg}$ . На временном интервале 250÷400 с подача газа в измерительный контур прекращалась. Плавное увеличение значений  $I_{\pi}$  и  $I_{\sigma}$  и уменьшение  $N_{Hg}$  объясняется утечкой газа из измерительного

контура установки за счет его недостаточной герметизации. На 400-й секунде осуществлялся продув измерительного контура атмосферным воздухом.

На рис. 2 представлены результаты подобных измерений при введении в измерительный контур паров толуола (от 0 до 137,5 мг/м<sup>3</sup>, начиная с 25-й до 205-й с). На временном интервале 205÷275 секунд подача паров прекращалась. Затем измерительный контур продувался атмосферным воздухом.

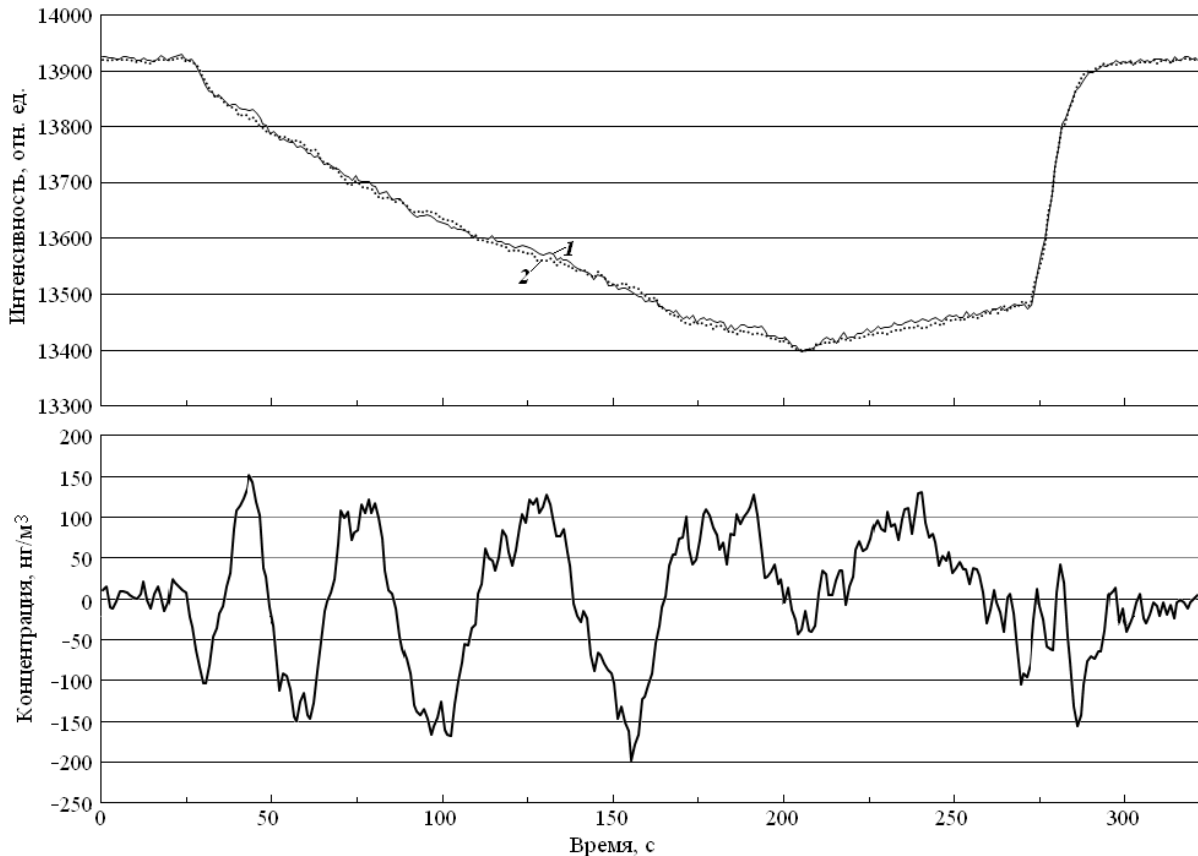


Рисунок 2. Результаты измерения концентрации толуола при плавной подаче его паров в измерительную кювету анализатора ДОГ-07.

Как видно из рис.2 последовательное введение порций толуола в измерительный контур приводит также к общему уменьшению измеряемых значений 1 -  $I_{\pi}$  и 2 -  $I_{\sigma}$  за счет поглощения  $\sigma^+$ ,  $\sigma^-$ , и  $\pi$ -компонент излучения РКЛ. Однако величина относительного поглощения этих компонент меняется постоянно, что приводит к изменению концентрации  $N_{Hg}$  определяемой по соотношению (1), в т.ч. и по знаку.

Одна из возможных причин наблюдаемого явления при регистрации концентраций толуола может быть объяснена следующим. При увеличении концентрации вводимых в измерительную кювету анализатора газов увеличивается их парциальное давление в газовой смеси. Молекула  $C_6H_6$  обладает кольцевой симметрией, поэтому не имеет дипольного момента, в то время как молекула  $C_6H_5CH_3$  за счет радикала  $CH_3$  обладает дипольным моментом.

Такое явление как сдвиг спектральных линий собственным давлением зависит от силы межмолекулярного взаимодействия. Этот сдвиг определяется как электростатическими, так и поляризационными взаимодействиями между молекулами. В случае бензола электростатическое взаимодействие определяется квадруполь-квадрупольным взаимодействием, а в случае толуола диполь-дипольным взаимодействием. Второе взаимодействие на несколько порядков более сильное. В поляризационных взаимодействиях

важную роль играет наличие или отсутствие у молекулы постоянного дипольного момента. Поэтому межмолекулярные взаимодействия в этих газах очень сильно отличаются.

Возбужденное электронное состояние рассматриваемых молекул имеет колебательно-вращательную структуру. Значит и электронная полоса поглощения имеет такую же структуру. В экспериментах эта структура, как правило, не разрешается. Ширина излучаемой линии РКЛ составляет  $\sim 0.3 \text{ см}^{-1}$ . В пределах этой ширины молекулы имеют несколько спектральных линий разной интенсивности (вращательная структура). Среди них могут быть очень интенсивные линии и слабые линии. При изменении парциального давления бензола (или толуола) в измерительной кювете анализатора происходит сдвиг спектральных линий этих молекул. Может реализоваться такая ситуация, когда при сдвиге линий собственным давлением газа сильная линия покинет область ртутной линии или наоборот, сильная линия войдет в область ртутной линии. Конечно, реализация такой ситуации более вероятна в случае толуола. Этим можно объяснить наблюдаемое явление – изменение соотношения величин интенсивностей  $I_{\pi}$  и  $I_{\sigma}$  при введении новых порций толуола в измерительную кювету ДОГ-07.

1. Мачулин Л.В., Латышев А.А. Методическое обеспечение мониторинга показателей качества газа, транспортируемого по магистральным газопроводам // Газовая промышленность. 2020. № 7. С. 40-50.

2. Филиппов А. Компонентный состав попутного нефтяного газа // Neftegaz.RU. 2013, No 10. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/aktualno/621996-komponentnyy-sostav-poputnogo-neftyanogo-gaza/> (Дата обращения: 15.09.2022).

3. Прямое определение содержания ртути в природном газе. Методика МИ 242/6-2015. URL: [https://www.lumex.ru/metodics/22ARU08.01.02-1\\_nat-gas.pdf](https://www.lumex.ru/metodics/22ARU08.01.02-1_nat-gas.pdf). (Дата обращения: 24.04.2023).

4. Ганеев А.А., Шолупов С.Е., Пупышев А.А., Большаков А.А., Погарев С.Е. Атомно-абсорбционный анализ: учебное пособие. СПб. Лань, 2011. 304 с.

5. Tatur V.V., Tikhomirov A.A. Selective Absorption Effect of Impurity Gases on Measurements in Atomic Absorption Mercury Analyzers Based on the Zeeman Effect // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35. Suppl. 1. P. S143-S147. doi: 10.1134/S1024856023010190.

6. Tatur V.V., Tikhomirov A.A., Abramochkin A.I., Korolev B.V., Mutnitskii N.G. Analyzer of Mercury Vapors in Atmospheric Air Based on a Mercury Capillary Lamp with Natural Isotope Composition // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32. No. 6. P. 701-705. doi: 10.1134/S1024856019060174.

7. Татур В.В., Тихомиров А.А. Экспериментальная оценка влияния бензола и толуола на измерение концентрации паров ртути в анализаторе на основе поперечного эффекта Зеемана // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 2. С.154-158. doi: 10.15372/AOO20230211.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОПУСКОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Фадеева П.А.*

Московский государственный университет, fadeeva.pa20@physics.msu.ru

Данные геофизических временных рядов дают ценную информацию о различных процессах на Земле, начиная от климатических особенностей и заканчивая сейсмической активностью. Однако эти наборы данных часто бывают с недостающими значениями или пропусками, которые могут препятствовать точному анализу и интерпретации.

В геофизических временных рядах могут отсутствовать данные по нескольким причинам, включая неисправность датчика, ошибки передачи данных и неполные измерения. Эти пропуски могут нарушить непрерывность набора данных, затрудняя точный анализ тенденций, закономерностей и аномалий. Более того, эти пропущенные значения могут снизить статистическую мощность моделей и привести к необъективным оценкам [1].

Временной ряд — это последовательность точек данных, собранных и записанных в течение определенного периода времени, обычно через регулярные промежутки. Он представляет значения переменной, измеренной и наблюдаемой в определенной период времени.

В работе рассматриваются варианты восстановления временных рядов на основе статистических методов и методов машинного обучения, которые позволяют анализировать и прогнозировать ряды динамики.

Статистический метод берет в основу модель  $ARIMA(p,d,q)$  — интегрированную модель авторегрессии–скользящего среднего, которая используется для прогнозирования и работы с нестационарными временными рядами и приводит их к стационарному виду путем взятия разности  $d$ -го порядка [2], где параметр  $p$  определяет количество авторегрессионных компонентов модели,  $q$  — число компонентов скользящего среднего. [3] В работе используется модель  $SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)$ , что позволяет учитывать сезонность данных.

Оценка параметров модели  $ARIMA$  включает анализ графиков автокорреляционной функции (ACF) и частичной автокорреляционной функции (PACF) для определения соответствующих значений  $p$ ,  $d$ ,  $q$ ,  $P$ ,  $D$  и  $Q$ . Эти графики дают представление о закономерностях и корреляциях, присутствующих в данных с различными временными интервалами, что помогает при выборе соответствующих компонентов модели. Параметры  $P$ ,  $D$ ,  $Q$  являются сезонными. Эти компоненты оценивают взаимосвязь между текущим наблюдением и сезонными задержками наблюдения, обеспечивая более точное представление сезонных закономерностей данных. Включив сезонные компоненты, модели учитывают не только историю временных рядов, но и значения с соответствующими задержками. Это позволяет более точно моделировать и прогнозировать данные временных рядов, демонстрирующие сезонные закономерности и зависимости.

Для восстановления временных рядов на основе методов машинного обучения, были применены сети прямого распространения сигнала, такие как сверточная нейронная сеть (CNN) и нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью (LSTM) [4].

Нейронная сеть прямого распространения сигнала — это тип искусственной нейронной сети, где связи между узлами не образуют замкнутых петель или циклов. В такой сети информация передается только в одном направлении — от входных узлов через возможные скрытые узлы к выходным узлам.



Нейронные сети долговременной кратковременной памяти (LSTM)[5] были разработаны с целью преодоления проблем, связанных с исчезающим и взрывающимся градиентом в обратном распространении в рекуррентных нейронных сетях. LSTM представляет собой вид рекуррентной нейронной сети (RNN)[6], в которой каждый нейрон оснащен ячейкой памяти, способной сохранять предыдущую информацию, которая может быть использована в дальнейшей работе сети, или забывать ее в случае необходимости.

Сверточная нейронная сеть (CNN) — это модель глубокого обучения, которая особенно хорошо подходит для анализа данных в виде сетки, таких, как изображения или временные ряды. Основными строительными блоками CNN являются сверточные слои, объединяющие слои и полностью связанные слои. Сверточная нейронная сеть (CNN) имеет характерную структуру, слои содержат несколько сверточных ядер для извлечения ключевых признаков из входных данных. Операция свертки увеличивает размерность этих признаков. Для уменьшения нагрузки на процесс обучения и уменьшения размерности признаков карт используется слой объединения. Целью слоя объединения является сокращение количества признаков и формирование окончательного результата с более низкой размерностью.

Для анализа определенности и точности моделей рассматривается среднеквадратичная ошибка — квадратный корень из среднего квадрата всех ошибок (Root Mean Square Error; RMSE).

В данной работе проведен анализ временных рядов влажности почвы во Вьетнаме с 2011 по 2020 годы. На графике представлена зависимость влажности почвы на глубине 5 см от времени наблюдения, а также прогнозируемые данные на 2017 год с помощью метода ARIMA. Помимо этого, были взяты другие геофизические параметры, такие как температура воздуха. Использовались долгосрочные записи температуры, состоящие из среднесуточных значений температуры за 46 лет, начиная с 1971 по 2017 год из Тверской области Российской Федерации.

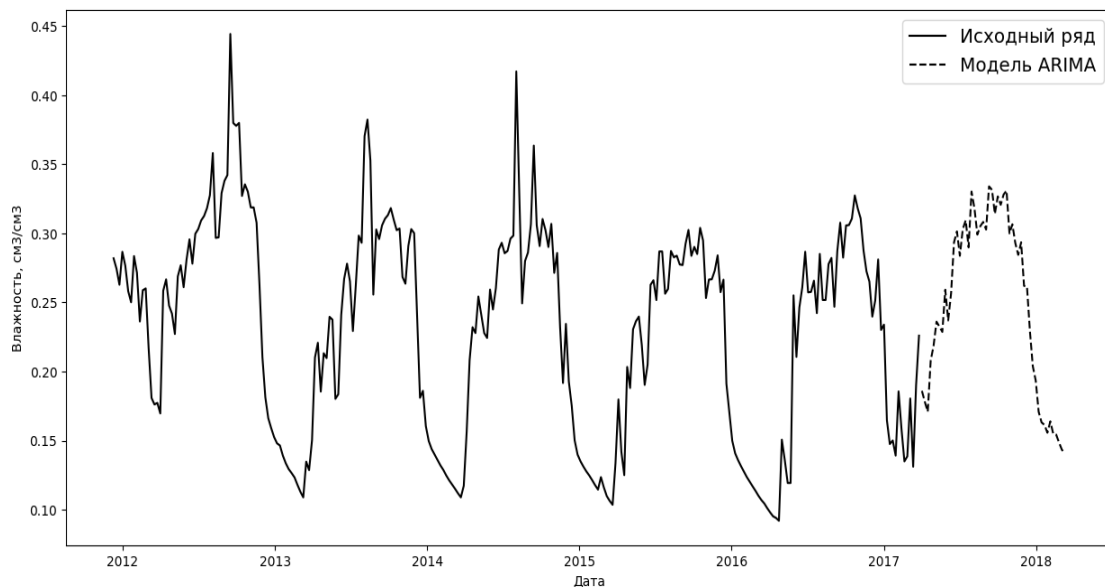


Рисунок 1. Зависимость влажности почвы от времени наблюдения.

В ходе данного исследования были рассмотрены пропуски разной длины во временных рядах данных. Пропущенные значения могут значительно влиять на точность анализа и прогнозирования, поэтому необходимо их должным образом учитывать и обрабатывать. Упор был сделан на исследовании и анализе пропусков во временном ряде

с целью сравнения соответствующих методов и подходов для их эффективной обработки и заполнения.

Для снижения влияния шума на анализ, было принято решение вычислить среднее значение влажности почвы на недельных интервалах. Такой подход помог усреднить данные и сгладить существующие колебания. В то же время данные о температуре не требовали дополнительной обработки, поскольку отсутствовали существенные источники шума и выбросов, которые могли бы повлиять на точность анализа.

На графиках ниже приведены результаты прогнозирования пропусков с использованием различных методов, таких как классический анализ методом ARIMA и подход с применением нейронной сети. Кроме того, ниже приведена таблица с результатами среднеквадратичного отклонения для всех моделей, которые были использованы в данной работе для анализа данных влажности почвы.

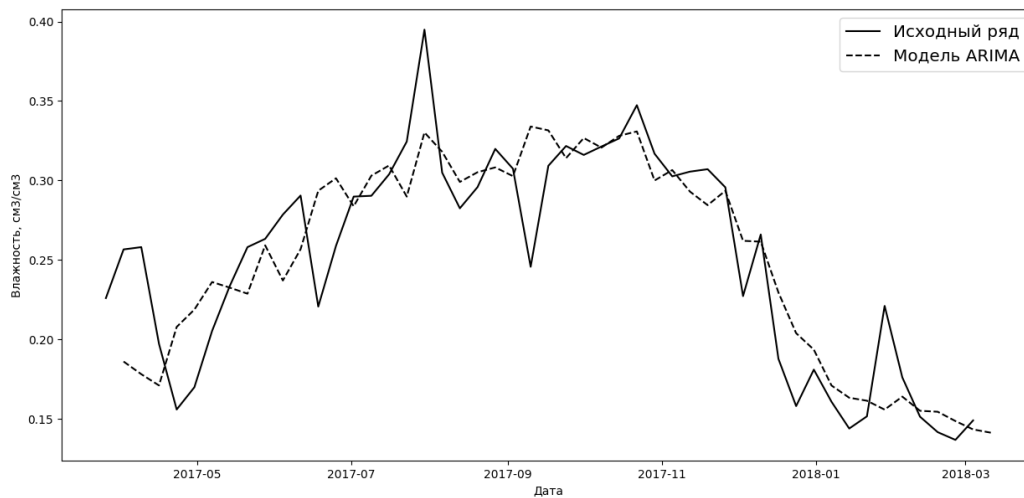


Рисунок 2. Зависимость влажности почвы от времени наблюдения. Исходный ряд и заполненный пропуск с помощью модели ARIMA.

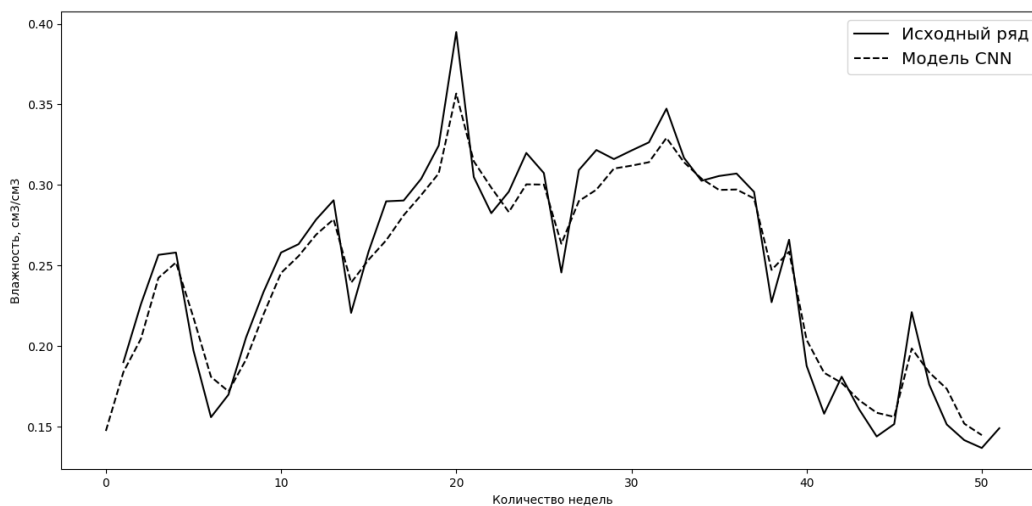


Рисунок 3. Зависимость влажности почвы от времени наблюдения. Исходный ряд и заполненный пропуск с помощью модели CNN.

**Таблица 1. Сравнение методов восстановления влажности почвы с помощью RMSE. Все величины приведены в  $\text{см}^3/\text{см}^3$ .**

Модель	ARIMA	MLP	LSTM	CNN
RMSE	0.034	0.017	0.026	0.015

При анализе результатов можно наблюдать, что нейронные сети проявили себя наравне или даже превзошли классическую модель, как визуально, так и с помощью количественной оценки среднеквадратичного отклонения (RMSE). Анализ результатов прогнозирования и восстановления пропусков в рядах температуры показал, что применение нейронных сетей привело к восстановлению с меньшей ошибкой по сравнению с классическим методом.

В ходе работы были применены методы машинного обучения для анализа и прогнозирования данных. Результаты были сравнимы по качеству с классическими методами прогнозирования. Некоторые из моделей показали возможность улучшения качества прогнозирования в сравнении с традиционными методами. Эти результаты говорят в пользу эффективности и применимости методов машинного обучения в анализе и прогнозировании временных рядов, открывая новые перспективы для дальнейших исследований и разработок в данной области.

1. Газарян В.А., Курбатова Ю.А., Овсянников Т.А., Шапкина Н.Е. // ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2015. № 5.

2. Кузнецова В.Е., Сивелькин В.А. Статистическое моделирование временных рядов с использованием метода классической декомпозиции (метода Census) ППП Statistica. Оренбург: ГОУ ВПО ОГУ. 2002. - 33 с.

3. Bianchi Marco. X-12 — ARIMA (Beta Version 1.1a) // The Economic Journal. Vol. 107. №. 444. Sep. 1997. p. 1613 - 1620

4. Makridakis, S., Spiliotis, E., Assimakopoulos, V. (2018). Statistical and Machine Learning forecasting methods: concerns and ways forward. PLoS ONE, 13(3)

5. Hochreiter, S., Schmidhuber, J. (1997). Long Short-Term Memory. Neural Computation, 9(8), ss. 1735-1780.

6. Russell, S.J., Norvig, P. (2010). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Third ed., New Jersey: Pearson Education, Inc.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Черкашина А.А., Брюханова В.В., Кеда И.С., Ну Е.В.  
Томский государственный университет, shanshina229@mail.ru

Дисперсные системы, состоящие из двух или более веществ равномерно распределено в объеме другого, широко распространены в природе. Этим объясняется необходимость изучения свойств дисперсных систем.

Размеры частиц дисперсной фазы, т.е. вещества, равномерно распределенного в объеме другого вещества, как правило, принимают значения от 0,01 до 100 мкм.

Сопоставимость размеров взвешенных частиц с длиной волны оптического диапазона, соответственно оптические методы являются предпочтительными.

Среди современных методов исследования и определения параметров компонентов окружающей среды можно выделить метод лазерного зондирования, характеризующийся высоким пространственным разрешением и возможностью получения информации в режиме реального времени.

Суть метода лазерного зондирования заключается в посылке в атмосферу импульсного лазерного излучения с известными характеристиками, приеме отраженного излучения и последующем анализе данных [1].

По времени регистрации эхо-сигнала определяется расстояние до исследуемого объема, а по его интенсивности – его оптические характеристики.

Лидарный сигнал от образования малой оптической плотности формируется фотонами, претерпевшими в исследованной среде только один акт рассеяния.

Увеличение оптической плотности среды приводит к многократному рассеянию излучения и вследствие этого изменения состояния поляризации рассеянного излучения.

Учёт изменения состояния поляризации рассеянного излучения позволяет существенно расширить возможности метода лазерного зондирования, основанного на упругом аэрозольном рассеянии, например, извлечь информацию о форме и ориентации частиц, формирующей зондируемый объем. Для отработки методики определения оптических и микрофизических свойств рассеивающей среды на кафедре ОЭСИДЗ ТГУ был разработан и собран лабораторный стенд для исследования многократного рассеяния в оптически плотных образованиях.

На рисунке 1 приведена схема лабораторного стенда для исследования свойств многократно рассеянного назад дисперсными системами лазерного излучения.

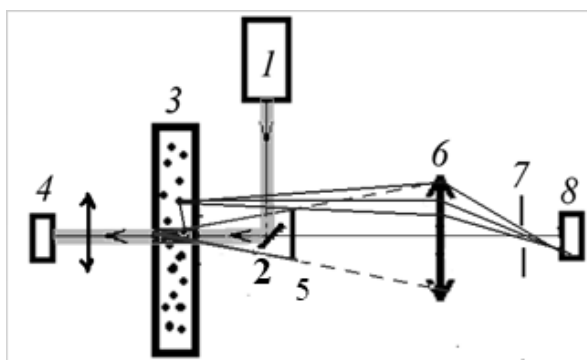


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки. 1 – источник лазерного излучения, 2 – поворотное зеркало, 3 – кювета с эмульсией, 4, 8 – ПЗС – камера, 5 – экран, 6 – положительная линза, 7 – диаграмма [2].

Коллимированный пучок лазерного излучения 1 падает на поворотное зеркало 2 под углом  $45^\circ$ , отразившись от которого проходит через кювету 3 с рассеивающим веществом и попадает на ПЗС-камеру 4, которая регистрирует излучение, рассеянное частицами среды в направлении малых углов.

Излучение, рассеянное средой в обратном направлении, распространяется в направлении линзы 6. При этом, однократно рассеянное назад под малыми углами излучение блокируется экраном 5, жестко закрепленным на единой опоре с зеркалом 2. Многократно рассеянное назад излучение проходит мимо экрана 5, попадает на линзу 6, в фокусе которой установлена ПЗС-камера 8. ПЗС-камеры 7 и 8 имеют одинаковые характеристики; их использование позволяет одновременно регистрировать распределения интенсивности излучения, прошедшего через исследуемую среду, и многократно рассеянного назад излучения [2].

Кювета 3 собрана из двух плоскопараллельных прозрачных пластинок, изготовленных из стекла (К8), закреплённых в корпусе с непрозрачными торцами и дном, и устанавливается на столик с возможностью регулировки положения его поверхности относительно поверхности оптического стола, на котором собран поляриметрический стенд. Для исключения интерференционных эффектов при отражении от более плотной среды (на границах раздела «воздух-стекло» и «жидкость-стекло») задавался небольшой угол ( $1-3^\circ$ ) наклона прозрачных поверхностей кюветы.

В начале измерений осуществлялась калибровка стенда:

– регистрировалось распределение интенсивности на каждой из двух ПЗС-камерах с закрытым объективом для определения собственных шумов камер (затем это значение вычиталось из измеренных значений интенсивности рассеянного вперёд и назад излучения);

– регистрировалось распределение интенсивности излучения, прошедшего через пустую кювету;

– затем в кювету заливалась дистиллированная вода, в которой так же, как и в воздухе, отсутствуют рассеивающие частицы.

В качестве рассеивающей среды в экспериментах использовалась водно-молочная эмульсия.

Молоко является типичной природной эмульсией (дисперсией) жира в воде – жировая фаза находится в плазме молока в виде мелких капель (шариков жира) более или менее правильной формы, окруженных защитной липопротеидной оболочкой.

Жировая фаза молока находится в плазме в виде дисперсии жировых шариков размером от 0,1 до 10 мкм, количество их в 1 мл от 1,5 до 3 млрд. Средний размер жировых шариков составляет 3,5 мкм (рисунок 2) [3].

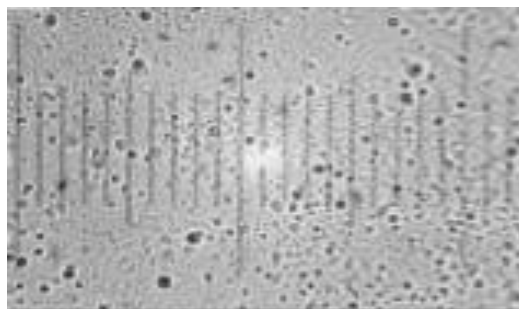


Рисунок 2. Микрофотографии жировых частиц молока.

Показатель преломления молочного жира, измеренный при комнатной температуре, варьирует от 1,4530 до 1,4578 [4].

В ходе эксперимента в кювету с дистиллированной водой добавлялось молоко и регистрировалось распределение интенсивности рассеянного лазерного излучения. Концентрация молока последовательно менялась от 0,04 до 0,60 с шагом 0,02 мл.

В эксперименте использовались четыре кюветы толщиной 11, 17, 26 и 36 мм. Объем воды  $V_v$  исследуемого вещества, заливаемого в каждую кювету, был разный (90, 120, 180 и 240 мл, соответственно). Таким образом, концентрация жировых частиц, содержащихся в водно-молочной эмульсии, варьировалось от 0,00017 до 0,00662 нг/мл.

Коэффициент рассеяния, который пропорционален концентрации рассеивающих частиц, определялся в соответствии с законом Бугера следующим образом:

$$\sigma = \frac{\tau}{l} = -\frac{1}{l} \ln \frac{I}{I_0},$$

где  $I$  – интенсивность, прошедшего через рассеивающую среду, излучения;  $I_0$  – интенсивность излучения лазера;  $\tau$  – оптическая толщина рассеивающей среды.

Было проведено 65 серий измерений, зависимости интенсивности рассеянного вперед и назад лазерного излучения от концентрации жировых частиц. Анализ данной зависимости позволяет выделить диапазон значений концентрации рассеивающих частиц, при котором поток обратно рассеянного излучения можно считать обусловленным однократным рассеянием.

1. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. – Н.: Наука, 1986. – 188 с.

2. Ни Е.В., Брюханов И.Д., Свиридов Е.И. Лабораторный стенд для исследования характеристик многократно рассеянного назад излучения дисперсными средами // Актуальные проблемы радиофизики. Труды Международной молодежной научной школы. Томск. 25-26 сентября 2017 г. г. Томск: Изд-во НТЛ, 2017. С. 70-74.

3. Яшин А.В., Романова А.А. Обоснование минимального размера жирового шарика, выделяемого при сепарировании молока // Нива Поволжья, № 4 (37), 2015. – с. 104-109.

4. Акулинин И.В., Осинцев А.М., Брагинский В.И. Разработка оптического устройства для анализа седиментации жира цельного молока // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 43. № 4, с. 212-219.

## ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОУГЛЕРОДНОГО ДАТИРОВАНИЯ В ИЗУЧЕНИИ ЭОЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАССЕЙНА Р. ВИЛЮЙ

*Шапошников Г.И., Лыткин В.М., Хорунова А.Ю., Васильева А.Н., Павлова М.Р.*  
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, gregory\_shaposhnikov@list.ru

В настоящее время в Центральной Якутии одним из наиболее изученных и информативных опорных разрезов позднечетвертичных дюнных отложений является обнажение Кысыл-Сырский песчаный массив (рис. 1) и одноименное обнажение, находящееся на правом берегу р. Виллюй в 20 км ниже п. Кысыл-Сыр. Здесь, в речном обрыве высотой до 35 м и протяженностью более 3 км вскрывается разрез песчаных отложений, возрастом от 50 тыс. л.н. до позднего голоцена, включающий аллювиальные и дюнные фации, погребенные почвенные горизонты, торфяники и др.

Начиная с 2012 авторами был получен значительный объем нового фактического материала, включающий результаты геоморфологических наблюдений, описания расчисток и серий неглубоких шурфов, а также большой объем аналитических работ. На основе данных исследований построен сводный разрез (рис. 2), где одним из ключевых компонентов является радиоуглеродное абсолютное датирование. В работе приведены данные об абсолютном датировании Кысыл-Сырского обнажения, включающие 28 датировок (таблица 1) и обсуждены полученные результаты.



Рисунок 1. Кысыл-Сырское обнажение дьолкуминской свиты в береговом обрыве 35-метровой террасы на правом берегу р. Виллюй в 20 км от пос. Кысыл-Сыр.

В нижней части аллювиальной пачки обнаружены скопления плавника, которая состоит из ели, лиственницы и кустарниковой березы (*Picea* sp., *Larix* sp., *Betula exilis*). Здесь же было найдено ребро бизона (*Bison* sp.). На основании серии радиоуглеродных датировок по древесине и растительному детриту (рис. 1, 2, таблица 1) установлено формирование данных отложений в интервале 45-30 тыс. л.н. (конец каргинского термочрона, МИС 3).

Нижняя пачка дюнных песков на основе двух оптико-люминесцентных датировок (см. рис. 2, таблица 1), полученных вблизи подошвы ( $18,0 \pm 1,4$  тыс. л.н.) и кровли ( $6,4 \pm 0,5$  тыс. л.н.), отнесена к сартанскому криохрону (МИС 2). Данный возраст также подтверждается практически полным отсутствием в отложениях пыльцы и крайне редкими остатками растительности, представленными лишь в верхней части пачки ярусами нитевидных корешков трав.

Маркирующий почвенный горизонт, отделяющий верхнюю и нижнюю пачки дюнных песков, на основании серии радиоуглеродных датировок (см. таблицу 1, рис. 2) отнесен к бореальному оптимуму голоцена. Наиболее детально эта почва была датирована на участке торфяной линзы, формировавшейся в интервале от 9 до 3,5 тыс. калиб. л.н.

(см. рис. 2). В нижней части торфяника встречено значительное количество частично обгоревших обломков лиственницы и кустарниковой березы, а в средней части преобладают остатки мхов и осок, в верхней – обильно появляются веточки верескоцветных, в том числе мирта болотного.

За пределами торфяника в этом же почвенном горизонте, а также на поверхности некоторых котловин выдувания во внутренних частях тукулана, установлены множественные древесные угли и обгорелая древесина. Это может свидетельствовать о крупном пожаре, предшествовавшем формированию верхней (современной) пачки дюнных отложений. Абсолютная датировка 5,29-4,84 тыс. калиб. л.н. (MPI-47) углей в верхней части расчистки (рис. 1, таблица 1) указывает, что это событие могло произойти в конце бореального оптимума.

В торфянике в пыльцевой колонке установлены две палинозоны [Павлова и др., 2017]. В нижней (зона березы), датированной интервалом 9,9-6,7 тыс. калиб. л.н., доминируют древесные породы (83,9%), среди которых преобладает *Betula sp.* (24,2-68,2%), встречена примесь *Picea*, *Pinus*. Кустарники и кустарнички (1-2%) представлены таксонами *Salix sp.*, *Ericales sp.*, *Alnaster sp.* и *Selaginella rupestris*. В пыльце травянистых (16,1-48,7%) преобладают *Cyperaceae*, *Poaceae* и *Artemisia*; споры (0,9-10,6%) представлены группой *Botryococcus*. В сравнении с подстилающими отложениями, концентрации пыльцы и спор в данной пыльцевой зоне значительно увеличиваются: деревьев в 6-9 раз, трав в 40 раз, спор в 12 раз.

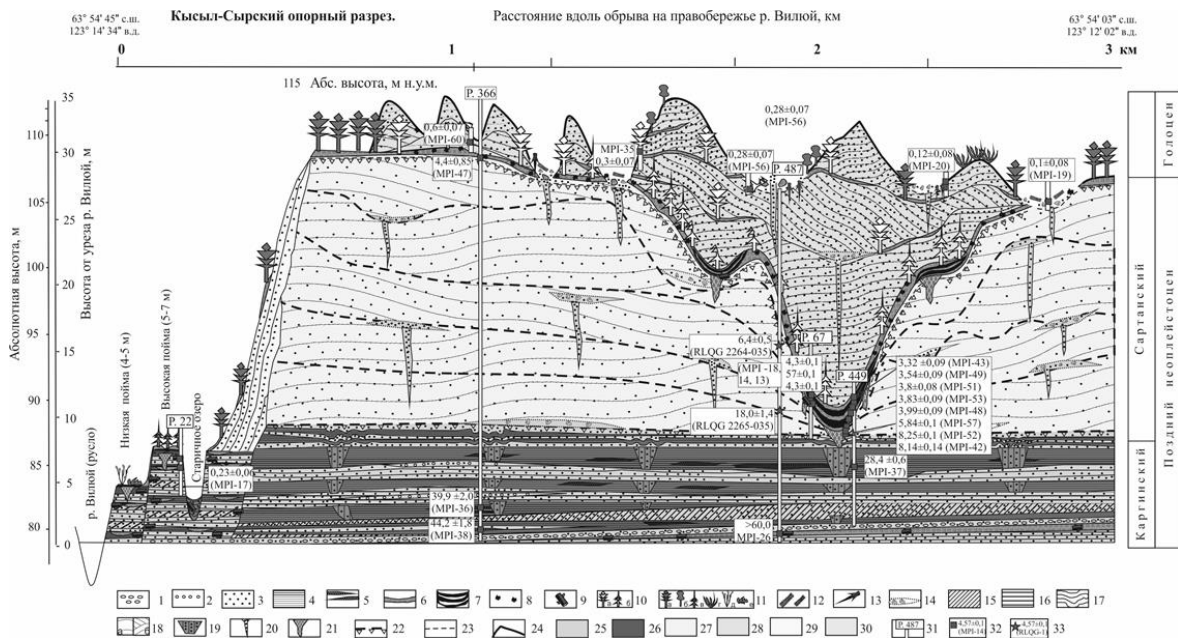


Рисунок 2. Сводный разрез Кысыл-Сырского опорного обнажения.

Верхняя палинозона (зона сосны), датированная интервалом 6,7-3,3 тыс. калиб. л. н., характеризуется доминированием древесных таксонов (98%), среди которых преобладает *Pinus sylvestris* (43,0–63,6%). Характерной особенностью является появление пыльцы *Pinus s/g Narphoxilon* (2,0–13,0%), представленного, вероятно, кедровым стлаником (*Pinus pumila*). Его обильные группировки установлены в составе современной растительности в южной части тукулана Кысыл-Сырский. Зона характеризуется резким снижением концентраций пыльцы кустарничкового (2-3%) и травянистого (2,3-9,2%) ярусов, а также исчезновением мхов.

Маркирующий почвенный горизонт, включающий исследованную нами линзу торфяника, имеет региональное распространение, он нередко вскрывается на глубине от 1 до 10 м под поверхностью современных дюн, а за пределами Кысыл-Сырского тукулана выходит на дневную поверхность, сливаясь с почвенно-растительным покровом 30-35-метровой террасы р. Вилюй.

Верхняя (современная) пачка дюнных отложений Кысыл-Сырского тукулана, содержит множество вертикально погребенных деревьев, прослоев слаборазвитых почв и угольков. Несколько датировок (рис. 2, таблица 1) по пням и фрагментам древесины из котловин выдувания свидетельствуют, что современные незакрепленные дюны образовались не более 500-600 л.н. и



сформировались на протяжении последнего голоценового похолодания (Малого ледникового периода).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-17-00054, <https://rscf.ru/project/21-17-00054/>.

**Таблица 1. Абсолютные датировки в пределах Кысыл-Сырского опорного обнажения дюнных отложений в бассейне нижнего течения р. Виллой.**

№ п/п	Лабораторный номер	Координаты, град. с.ш.; в.д.	Глубина от поверхности, м	Материал пробы	Возраст	
					14С, лет	Кал. лет, ( $\alpha > 95,4\%$ )
Отдельно стоящие пни и мертвые деревья в современных котловинах выдувания						
1	MPI-15	63.9262; 123.2677	0.55–0.85	Отмершие деревья, вертикально погребенные в современных дюнах	Современный	
2	MPI-19	63.9105; 123.2278	2.9		100 ± 80	290–0
3	MPI-20	63.9104; 123.2277	1.0		120 ± 85	295–0
4	MPI-35	63.9161; 123.2337	0.8		325 ± 65	510–155
Расчистка 20 в береговом обрыве современной высокой поймы (5 – 7 м), покрытой еловым лесом						
5	MPI-16	63.9276; 123.2372	0.75	Фрагменты кустарников (плавник)	Современный	
6	MPI-17		2.5–3.0	Древесина лиственницы (плавник)	230 ± 60	470–0
Расчистка 487						
7	MPI-56	63.9243; 123.2374	0–0.3	Вертикально погребенное мертвое дерево	280 ± 65	500–265
8	RLQG 2264-035		2.0	Кварцевый песок, ИК-ОСЛ	–	6400 ± 500
9	RLQG 2265-035		23	Кварцевый песок, ИК-ОСЛ	–	18 000 ± 1400
10	MPI-26		32	Кустарничково-травянистый торф	44 200 ± 1800	>45200
Расчистка 366						
11	MPI-60	63.9269; 123.238	1.4–1.6	Вертикально погребенное мертвое дерево	600 ± 75	675–510
12	MPI-47	63.9194; 123.2677	1.0	Обгорелая древесина и угли в погребенном почвенном горизонте	4400 ± 85	5290–4840
13	MPI-29	63.9186; 123.234	32	Мелкие обломки древесины	35 600 ± 1500	43 200–36 800
14	MPI-36	63.9162; 123.2331	30	Рассеянный органический детрит	39 900 ± 2000	49 000–41 000
15	MPI-38		33		44 200 ± 1800	>45200
Расчистка 449						
16	MPI-43	63.9029; 123.2113	0.1–0.2	Мохово-осоковый торф	3320 ± 90	3825–3370
17	MPI-49		0.5–0.6	Осоковый торф	3540 ± 95	4090–3590
18	MPI-51		0.8–0.9	Моховой торф	3800 ± 75	4415–3980
19	MPI-53		1.0–1.1	Осоково-моховой торф	3830 ± 90	4515–3975

20	MPI-48		1.2–1.3	Кустарничковый торф с листьями лоха болотного	3990 ± 90	4815–4155
22	MPI-52		1.3–1.4	Кустарничковый торф с обломками древесины	5840 ± 100	6890–6410
23	MPI-57		1.6–1.7	Торф с примесью гумуса	8250 ± 100	9470–9010
24	MPI-42		1.7–1.8	Гумус из интенсивно гумусированной супеси	8140 ± 135	9440–8640
25	MPI-37		7.0	Рассеянный органический детрит	28 400 ± 600	33 800–31200
Расчистка 67						
26	MPI-13	63.9042; 123.2159	1.0	Обожженная древесина лиственницы	4300 ± 90	5280–4580
27	MPI-14	63.9243; 123.2374	0.95	Торф мохово-осоковый слаборазложившийся	4570 ± 110	5580–4880
28	MPI-18	63.9186; 123.2348	0.7–1.0	Веточки кустарниковой березы	4120 ± 110	4880–420

1. Галанин А.А., Павлова М.Р. Позднечетвертичные дюнные образования (дьюлкуминская свита) в Центральной Якутии (Часть 1) // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 6, с. 3–19.

2. Галанин А.А. Современные представления о генезисе и возрасте позднечетвертичных покровных отложений Центральной Якутии // Материалы Всерос. Науч.-практ. Конф. “Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России”. Якутск, Изд. Дом СВФУ, 2016, с. 509–512.

3. Шапошников Г.И., Галанин А.А., Лыткин В.М., Павлова М.Р. Абсолютные датировки радиоуглеродной лаборатории ИМЗ СО РАН с 2015 по 2017 гг. // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2019, т. 24, № 3, с. 39–49.

4. Галанин А.А. Позднечетвертичные криопустыни Центральной Якутии // Фундаментальные проблемы квартара: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований. Материалы X Всерос. Совещ. По изучению четвертичного периода. М., ГЕОС, 2017, с. 83–85.4.

5. Галанин А.А., Бурнашева М.П., Дьячковский А.П., Шапошников Г.И. Принципы и технология современного жидкостно-сцинтилляционного радиоуглеродного метода // Наука и техника в Якутии. 2014. № 2 (27). С. 24–32.

6. Галанин А.А., Павлова М.Р., Шапошников Г.И., Лыткин В.М. Тукуланы: песчаные пустыни Якутии // Природа, 2016, № 11, с. 44–55.

7. Карта четвертичных отложений СССР / Ред. Г.С. Ганешин. Мин-во геологии СССР, ФГУП “ВСЕГЕИ”, 1959, 8 л.

8. Куть А.А. Эолово-мерзлотные образования (тукуланы) Центральной Якутии: строение, генезис, возраст, закономерности распространения: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Якутск, 2015, 22 с.

9. Галанин А.А., Дьячковский А.П., Лыткин В.М. и др. Результаты определения абсолютного возраста образцов в радиоуглеродной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН // Наука и образование, 2015, № 4 (80), с. 45–49.

## Круглый стол «Ритм углерода» Углерод в наземных экосистемах: мониторинг

### ОЦЕНКИ ПОТОКОВ УГЛЕРОДА В ЭКОСИСТЕМАХ КОТЛОВИННЫХ СТЕПЕЙ ТЫВЫ

*Голубятников Л.Л.<sup>1</sup>, Заров Е.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, golub@ifaran.ru

<sup>2</sup>Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, zarov.evgen@yandex.ru

К настоящему времени на территории России роль степных экосистем в биогенном цикле углерода слабо изучена [1]. В данной работе для равнинных степных экосистем межгорных котловин Тывы оценены углеродный ( $C-CO_2$ ) баланс и его компоненты: интенсивность процесса аккумуляции атмосферного углерода растительными сообществами этих экосистем (первичная биологическая продукция, NPP) и эмиссия углерода в результате деструкции почвенного органического вещества микроорганизмами (гетеротрофное дыхание почвы,  $R_H$ ).

На территории Республики Тыва степные экосистемы занимают Турано-Уюкскую, Центрально-Тувинскую и Убсунурскую котловины [2, 3] (рис. 1). Рельеф котловин холмисто-равнинный и мелкосопочный. Турано-Уюкская котловина расположена в северной части центрального региона Республики Тыва. Протяжённость котловины с запада на восток составляет около 80 км, с севера на юг – от 30 до 40 км. Преобладающие высоты составляют от 700 до 1100 м. Центрально-Тувинская котловина расположена в центральной части Тывы примерно между  $51^\circ-52^\circ$  с.ш. и  $90^\circ-96^\circ$  в.д. Эта котловина является обширной межгорной депрессией на территории Тывы. Протяжённость котловины с запада на восток составляет около 400 км, с севера на юг – от 25–30 до 60–80 км. Абсолютные высоты рельефа изменяются от 600 до 900 м. Невысоким хребтом Адар-Даш Центрально-Тувинская котловина разделена на западную и восточную части – Хемчикскую и Улуг-Хемскую котловины, соответственно. Местами в котловину вдаются отроги соседних хребтов. Котловину прорезает долина Верхнего Енисея, часть этой долины протяжённостью около 79 км затоплена водами Саяно-Шушенского водохранилища. Убсунурская котловина расположена на границе Республики Тыва и Монгольской Народной Республики примерно между  $48-50^\circ$  с.ш. и  $91-99^\circ$  в.д. Протяжённость котловины с севера на юг составляет 160 км, с запада на восток – 600 км. На территории Республики Тыва находится северная часть Убсунурской котловины.

Для рассматриваемого региона характерен резко континентальный климат. В зимний период котловины находятся в зоне обширного и устойчивого центрально-азиатского антициклона [3]. На основе данных семи метеорологических станций, расположенных на территориях котловин, за период 2009–2022 гг. определены основные климатические характеристики изучаемой территории (табл.1). Среднегодовая температура воздуха имеет отрицательные значения и изменяется от  $-0.5^\circ C$  до  $-2.5^\circ C$ . Количество годовых осадков составляет в среднем 190–380 мм. Вегетационный период продолжается с мая по сентябрь. Лето, как правило, жаркое: средняя температура июля составляет от  $+18^\circ C$  до  $+21^\circ C$ . В тёплый период года выпадает 72–81% годовой суммы осадков. Зима в регионе холодная с преобладанием ясных и солнечных дней, малоснежная (высота снежного покрова не превышает 20 см). Средняя температура

января составляет от  $-26^{\circ}\text{C}$  до  $-31^{\circ}\text{C}$ , минимальные температуры фиксировались в диапазоне от  $-44^{\circ}\text{C}$  до  $-49^{\circ}\text{C}$ .

На равнинной территории Турано-Уюкской котловины распространены преимущественно экосистемы луговых степей, присутствуют экосистемы сухих степей.

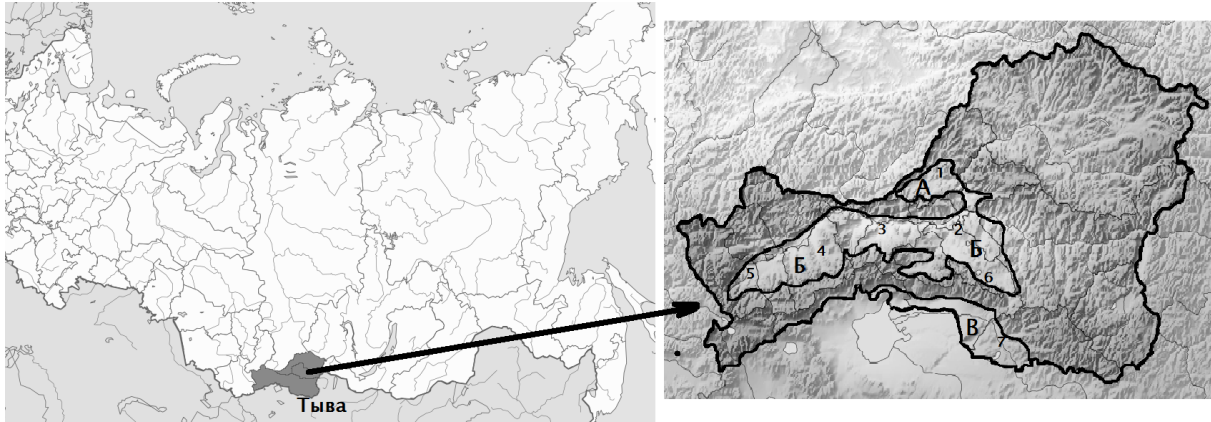


Рисунок 1. Республика Тыва: котловины Турано-Уюкская (А), Центрально-Тувинская (Б), Убсунурская (В); метеостанции 1 – Туран, 2 – Кызыл, 3 – Шагонар, 4 – Чадан, 5 – Тээли, 6 – Сосновка, 7 – Эрзин.

Значительная часть степных территорий этой котловины используется в качестве пастбищ, сенокосов, ряд степных участков распахананы под выращивание зерновых культур [3, 4]. На равнинной территории Центрально-Тувинской котловины экосистемы образуют мозаичную структуру из настоящих, сухих и опустыненных степей. Луговые степи встречаются на небольших по площади территориях расположенных в предгорьях хребтов ограничивающих котловину с юга [2, 3]. Значительная часть степных территорий котловины используется как пастбища и сенокосы, небольшие степные участки распахананы под выращивание сельскохозяйственных культур. На равнинной территории северной части Убсунурской котловины представлена сложная мозаичная ландшафтная структура из настоящих, сухих и опустыненных степей [5]. Значительная часть этих степных территорий используется как пастбища и сенокосы.

На основе дешифровки спутниковых изображений с космического аппарата Landsat-8 проведено исследование пространственного распределения экосистем на территориях рассматриваемых межгорных котловин. Использовались космоснимки для летних периодов 2019–2022 годов. Исходные материалы спутниковой съемки получены с сайта геологической службы США ([http:// earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov)). Обработка космических снимков проведена в геоинформационной системе GRASS с использованием метода классификации SMAP. В результате анализа космических снимков на территориях котловин выделены семь классов наземной поверхности: горные территории, равнинные степи, равнинные лесные массивы, зарастающие деревьями лесные гари на равнинах, поймы рек и приозерные территории, водные объекты, инфраструктура (города, поселки, стойбища, дороги и пр.). На территории занятой классом наземной поверхности "равнинные степи" были выделены следующие типы степных территорий: сухая степь, опустыненная степь, луговая степь, территории с опустыниванием (пески, котлы выдувания и пр.), залежи с кустарниковой и древесной растительностью, пашни и залежи.

Согласно выполненным расчетам равнинные степные экосистемы занимают в Турано-Уюкской котловине около 0.7 тыс. км<sup>2</sup>, в Центрально-Тувинской – 10 тыс. км<sup>2</sup>, в Убсунурской – 5.4 тыс. км<sup>2</sup>. В настоящее время в Центрально-Тувинской котловине под

пашню используется около 4% её территории, в Турано-Уюкской котловине распахивается около 12% её территории. На заброшенных пашнях (залежах) идет процесс постепенно восстановления степного травяного покрова. Как показывают исследования [3] на залежах возраста более двадцати лет видовой состав травяных сообществ оказывается близок к видовому составу исходных степных сообществ. На некоторых залежах Центрально-Тувинской котловины возникают редины из вязов, тополей, сосны, лиственницы.

**Таблица 1. Основные климатические характеристики котловин со степными экосистемами.**

Метео-станция	Котловина	Т, °С			Р, мм/год	Р <sub>тп</sub> , %
		год	январь	июль		
Туран	Турано-Уюкская	-2.4	-29.2	17.9	333.8	72
Тээли	Центрально-Тувинская	-0.6	-25.9	18.8	224.2	79
Чадан	Центрально-Тувинская	-0.8	-27.5	19.5	289.1	81
Шагонар	Центрально-Тувинская	-1.0	-30.3	20.9	220.3	76
Кызыл	Центрально-Тувинская	-0.5	-29.1	21.0	259.1	75
Сосновка	Центрально-Тувинская	-1.1	-26.0	18.1	382.2	74
Эрзин	Убсунурская	-2.5	-31.5	19.7	189.1	73

Примечание. Т – приповерхностная температура воздуха, Р – количество осадков, Р<sub>тп</sub> – количество осадков за теплый период года. Климатические характеристики определены на основе данных сайта "Погода и климат" <http://www.pogodaiklimat.ru/>.

Первичная биологическая продукция (NPP) определяется количеством органического вещества, накапливающимся за определенный интервал времени (обычно это год) на единице площади в надземной и подземной частях растительного сообщества. Оценки NPP степных экосистем в Турано-Уюкской, Центрально-Тувинской и Убсунурской котловинах получены на основе геоинформационно-аналитического метода с использованием данных эмпирически измеренных значений этой величины из работ [3, 6, 7]. Для перевода значений NPP, выраженных через массу сухого вещества, в углеродные единицы использованы коэффициенты, полученные в [8]. Значения NPP степных экосистем рассматриваемых котловин уменьшаются от луговых степей к опустыненным. Для луговых степей характерна величина NPP  $1273 \pm 275$  гСм<sup>-2</sup>год<sup>-1</sup> (среднее ± стандартное отклонение) В опустыненных степях рассматриваемого региона значение NPP уменьшается до  $374 \pm 67$  гСм<sup>-2</sup>год<sup>-1</sup>. Согласно полученным результатам равнинные степные экосистемы Турано-Уюкской котловины ежегодно аккумулируют  $0.7 \pm 0.2$  МтС, Центрально-Тувинской котловины –  $6.9 \pm 0.9$  МтС, Убсунурской котловины –  $3.0 \pm 0.5$  МтС.

Оценки почвенного дыхания степных экосистем исследуемого региона получены на основе регрессионной T&P-модели [9]. Эта модель позволяет оценивать среднемесячную интенсивность выделения CO<sub>2</sub> из почв на основе среднемесячной приземной температуры воздуха и количества осадков за месяц. В рамках настоящего исследования значение годового потока CO<sub>2</sub> в атмосферу из почв степных экосистем рассматриваемых межгорных котловин вычислялось как среднее соответствующих значений годовых потоков CO<sub>2</sub> по ансамблю из предложенных в [1] версий T&P-модели. Согласно [10] доля гетеротрофного дыхания в общем потоке CO<sub>2</sub> из почв травяных экосистем составляет 55%. Выполненные расчеты показали, что в результате гетеротрофного дыхания из почв

степных экосистем Турано-Уюкской, Центрально-Тувинской и Убсунурской котловин в атмосферу ежегодно поступает  $0.2 \pm 0.01$  МтС,  $2.8 \pm 0.1$  МтС,  $1.2 \pm 0.2$  МтС соответственно.

Функционирование экосистемы в качестве стока или источника атмосферного  $\text{CO}_2$  определяется знаком величины углеродного ( $\text{C}-\text{CO}_2$ ) баланса рассматриваемой экосистемы. В случае природных степных экосистем углеродный баланс вычисляется как разность между величинами  $\text{NPP}$  и  $R_n$  [1]. Если значение углеродного баланса положительное, то рассматриваемая экосистема является стоком атмосферного углерода. В случае если значение углеродного баланса отрицательное, то экосистема представляет собой источник поступления углерода в атмосферу.

Согласно полученным оценкам среднее значение углеродного баланса для равнинных степных экосистем межгорных котловин Тывы составляет  $398 \pm 105$  гСм<sup>-2</sup>год<sup>-1</sup>, варьируя от  $272$  гСм<sup>-2</sup>год<sup>-1</sup> в западной части Центрально-Тувинской котловины до  $759$  гСм<sup>-2</sup>год<sup>-1</sup> в Турано-Уюкской котловине. Выполненные расчеты показали, что равнинные степные экосистемы рассматриваемых котловин ежегодно поглощают  $6.4 \pm 1.7$  МтС. Результаты исследования показали, что исследуемые степные экосистемы являются стоком атмосферного углерода.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6) и Государственного задания "Моделирование влияния изменений климата на экологические процессы и системы" (рег. № 1021032424681-6).

1. Голубятников Л.Л., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О. Оценка баланса углерода степных экосистем России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 1. С. 71–87.

2. Голубятников Л.Л., Заров Е.А. Пространственное распределение экосистем в Центрально-Тувинской котловине // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2021. Вып. 6. С. 75-78.

3. Титлянова А.А., Самбу А.Д. Сукцессии в травяных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 191 с.

4. Самбу А.Д., Прудникова Т.Н., Голубятников Л.Л. Природные ресурсы Республики Тыва. Том II. Новосибирск: Издательство Гарамонд, 2020. 208 с.

5. Голубятников Л.Л., Заров Е.А. Анализ изменений растительного покрова в северной части Убсунурской котловины // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2020. Вып. 5. С. 111–114.

6. Гаджиев И.М., Королюк А.Ю., Титлянова А.А. и др. Степи Центральной Азии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 299 с.

7. Титлянова А.А., Косых Н.П., Кыргыс Ч.С. и др. Продуктивность травяных экосистем Тувы // Почвы и окружающая среда. 2020. Т. 3. № 2. e110.

8. Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A., Svirezhev Yu.M. Model of the total exchange carbon flux for terrestrial ecosystems // Ecological Modelling. 1998. V. 108. P. 265–276.

9. Raich J.W., Potter C.S., Bhagawatti D. Interannual variability in global soil respiration, 1980-94 // Global Change Biology. 2002. V. 8. P. 800–812.

10. Kurganova I.N. Carbon dioxide emission from soils of Russian terrestrial ecosystems. Interim Report, IR-02-070. Laxenburg, Austria: IIASA, 2003. 64 p.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Давыдов Д.К.<sup>1</sup>, Дюкарев Е.А.<sup>2,3</sup>, Плотников А.А.<sup>1</sup>, Фофонов А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, alenfo@iao.ru

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

<sup>3</sup>Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

Определение продуктивности поглощения атмосферного углерода наземными экосистемами является актуальной задачей для понимания причин изменения климата Земли и планирование необходимых мероприятий по предотвращению катастрофических последствий. Долгосрочные и высокоточные стандартизированные измерения потоков парниковых газов (ПГ) увеличивают доступность и удобство использования накопленных данных для моделирования происходящих процессов. Автоматизированные камерные системы работающие в закрытом динамическом режиме (*Non-Steady-State Chambers*), наряду с методом турбулентных пульсаций (*Eddy Covariance Method*), рекомендованы в качестве основных подходов для измерений потоков углекислого газа ( $CO_2$ ), метан ( $CH_4$ ) и закиси азота ( $N_2O$ ) на границе «почва – атмосфера» на станциях мониторинга входящих в систему ICOS (Integrated Carbon Observation System) [1].

Камерные измерения полезны при определении временных и пространственных неоднородностей потоков ПГ, например, при разделении суммарных потоков  $CO_2$  на их компоненты (дыхание/поглощение) и т.д. Благодаря относительной дешевизне и доступности различных коммерческих газоанализаторов, этот метод получил широкое признание в исследовательском сообществе.

Методика измерений основана на регистрации концентрации исследуемого газа внутри кратковременно изолируемой от атмосферы камеры. Воздушная проба подается непосредственно к измерительным приборам или отбирается в емкости для последующего лабораторного анализа. По разности значений концентрации исследуемого газа в начале и по окончании экспозиции камеры методом линейной регрессии определяется величина его стока или эмиссии на границе «почва – атмосфера» для конкретного участка наземного покрытия. При наличии большего количества данных по изменению концентраций ПГ в воздушных пробах из изолированного объема возможно использование других методов вычисления газовых потоков (по наименьшим квадратам, экспоненциальный и т.д.) [2].

Другим более современным автоматизированным методом количественного учета источников и стоков ПГ в пограничном слое атмосферы является метод турбулентных пульсаций. Данный метод позволяет проводить долговременные измерения, внося минимальное влияние на локальную экосистему во время проведения эксперимента. Метод турбулентных пульсаций хорошо масштабируется, позволяет проводить измерения потоков концентрации как от отдельного локального источника/стока ПГ, так и охватить значительную площадь в несколько квадратных километров с помощью одной приборной измерительной ячейки [3].

Суть метода турбулентных пульсаций заключается в одновременном измерении вертикальной скорости потоков воздушной массы и концентрации исследуемого газа. Первая задача решается при помощи ультразвуковых анемометров, а вторая – с использованием газоанализаторов, работающих на основе различных методов. Измерения концентрации  $CO_2$  и паров воды  $H_2O$ , как правило, проводят с помощью метода недисперсионной инфракрасной спектроскопии (*Non-Dispersive Infrared Absorption Spectroscopy*)

[4]. Измерения концентрации  $CH_4$  проводят уже методом диодно-лазерной спектроскопии в режиме  $2f$ -модуляции с помощью многопроходной кюветы типа Эррио, с эффективной длиной оптического пути в несколько десятков метров [5]. Для минимально необходимого количественного описания турбулентных процессов атмосферы необходимо проводить измерения концентрации исследуемого газа с точностью не хуже 1 % и скорости ветра с точностью не хуже единиц см/сек и частотой в десятки Гц.

Углекислый газ и метан являются ПГ, которые чаще всего контролируются с использованием указанных методов. В естественном углеродном цикле  $CO_2$  играет ключевую роль в ряде биологических процессов (фотосинтез, дыхание и т. д.) и является одним из наиболее распространенных и важных газов в системе «суша – океан – атмосфера».  $CH_4$  также обладает сильным парниковым эффектом и играет важную роль в определении окислительной способности тропосферы и истощении стратосферного озона.

Оба газа имеют как природные, так и антропогенные источники. Наблюдаемые изменения в концентрации  $CO_2$  и  $CH_4$  в атмосфере являются результатом нарушения динамического баланса между антропогенными выбросами и естественными процессами, которые приводят к частичному удалению этих газов из атмосферы.

По-прежнему существуют обширные регионы с источниками и стоками  $CO_2$  и  $CH_4$ , которые слабо изучены. К малоизученным территориям относятся и районы Западной Сибири, где наличие природных водно-болотных угодий и добыча ископаемого топлива приводят к значительным выбросам  $CH_4$  в атмосферу. В тоже время, эти же ненарушенные экосистемы являются эффективными поглотителями атмосферного углерода и надежными резервуарами его депонирования на тысячелетия.

Именно, использование различных автоматизированных систем для изучения потоков ПГ на границе «почва – атмосфера» позволяет проводить точные измерения в удаленных труднодоступных районах, независимо от погоды и времени суток, с минимальными нарушениями поверхности почвы и получать данные с высоким разрешением в течение продолжительных периодов времени.

Измерительный комплекс «Flux-NIES» с 6 автоматическими камерами был разработан совместно National Institute for Environmental Studies (NIES, Цукуба, Япония) и Институтом оптики атмосферы (ИОА СО РАН, Томск, Россия) в конце 1990-х начале 2000-х гг. для исследования потоков ПГ на границы «болотная почва – атмосфера». В настоящее время на полевом стационаре «Plotnikovo» Института почвоведения и агрохимии (ИПА СО РАН, Новосибирск, Россия) на Бакчарском болоте в Томской области эксплуатируются два почти идентичных комплекса (на площадках «Е» и «О») [6]. Измерения проводятся ежегодно в теплый сезон (с мая по октябрь).

В качестве газоанализатора  $CH_4$  в состав измерительного оборудования работает модифицированный полупроводниковый сенсор TGS-842 (Figaro Inc., США). Для измерения концентраций  $CO_2$  используется недисперсионный инфракрасный NDIR-газоанализатор LI-820 (Licor Inc., США). Подача пробы воздуха от камер к приборам газоанализа осуществляется нагнетающим насосом типа N86KN (KNF Neuberger GmbH, Германия) по системе полиэтиленовых трубок ( $\varnothing$  4 мм) и пневмоэлектрических клапанов. Управление измерительным комплексом, сбор и сохранение информации осуществляется через дата-логгер CR1000 (Campbell Sci., США). Для определения чувствительности газоанализаторов, в измерительном комплексе «Flux-NIES» дважды в сутки используется процедура калибровки по стандартным газовым смесям [7].



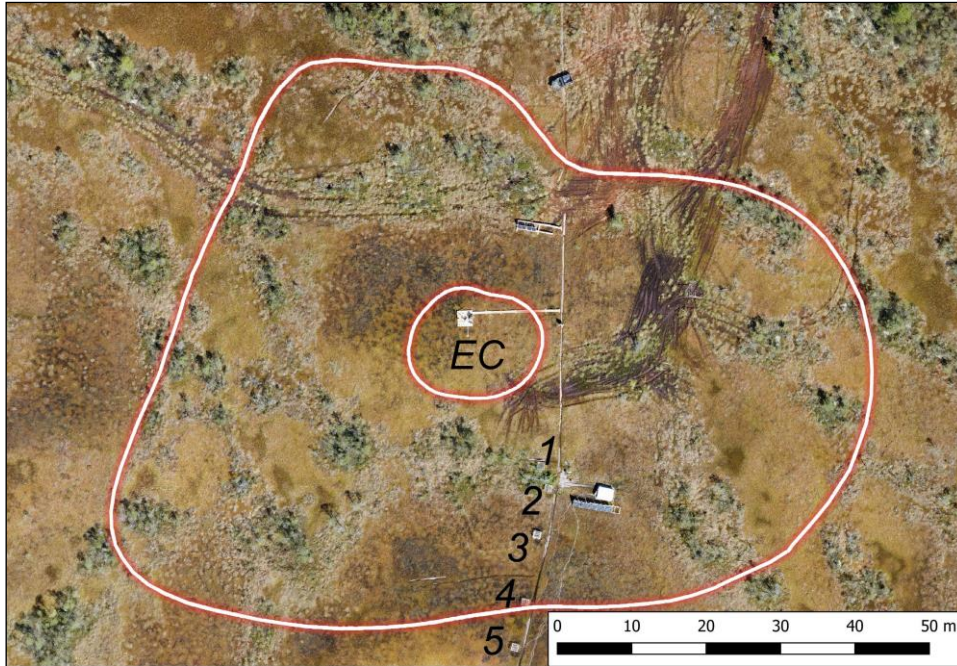


Рисунок 1. Футпринт измерительной мачты EC и трансект (1-5) камерного комплекса «Flux-NIES» (площадка «О» на Плотниковском участке Бакчарского болота).

В 2022 году исследовательская мачта Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС СО РАН, Томск, Россия), измеряющая потоки  $CO_2$ , тепла и влаги методом турбулентных пульсаций (EC, Eddy Covariance) была установлена на площадке «О» стационара «Plotnikovo». В состав оборудования мачты пульсационных измерений входили газоанализатор открытого типа LI-7500DS (Licor Inc., США), ультразвуковой анемометр uSonic-3 (Metek GmbH, Германия) и набор регистраторов приходящей/отраженной солнечной радиации, потоков тепла и влаги.

Для автономного функционирования всех комплексов в качестве бесперебойного источника электроэнергии используется набор аккумуляторных батарей, подзарядка которых осуществляется в дневное время солнечными панелями.

Рассмотрим некоторые результаты применения описанных автоматизированных измерительных комплексов для измерения газовых потоков на границе «болотная почва – атмосфера».

На рисунке 1 приведен фотоснимок месторасположения мачты EC на измерительной площадке «О» в грядово-мочажинном болотном комплексе. В нижней части снимка цифрами указано расположение камер измерительного комплекса «Flux-NIES», которые формируют трансект (transect) исследуемой экосистемы.

Замкнутые кривые определяют области охвата для измерения потоков  $CO_2$  мачтой EC. При этом, внутреннее кольцо дает вклад ~50%, а внешнее кольцо ~90% от величины потока. Обычно эту область и понимают под футпринтом (footprint). Расстояние от мачты до границы 90% футпринта варьирует от 24 до 56 м. Футпринт рассчитан по данным измерений мачты EC с 21 мая по 14 июня. Для всего вегетационного периода область немного меняется, что определяется погодными условиями, в частности, изменениями в розе ветров.

Принято считать, что продуктивность любой экосистемы по поглощению атмосферного углерода или валовая первичная продукция (GPP) определяется как разность суммарного обмена экосистемы (NEE) и ее дыхания (ER):  $GPP = NEE - ER$ .

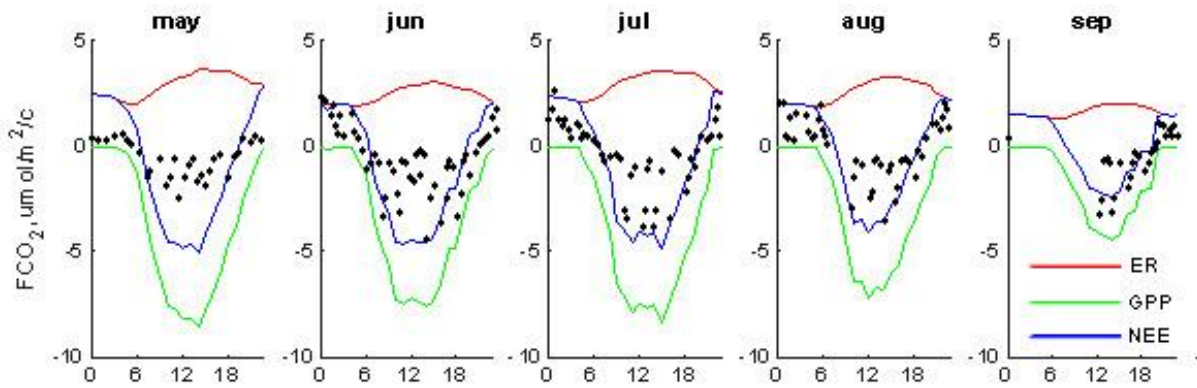


Рисунок 2. Средний суточный ход потоков  $CO_2$  полученных мачтой ЕС и измерения камерного комплекса «Flux-NIES» (■) за отдельные дни с мая по сентябрь 2022 г.

На рисунке 2 представлены среднесуточные потоки  $CO_2$  по данным пульсационных измерений мачты ЕС и модели разделения потоков на грядово-мочажинном комплексе Бакчарского болота для отдельных месяцев 2022 г. Очевидно, что в теплое время года болотные экосистемы являются активными поглотителями атмосферного углерода.

Для сравнения, на рисунке нанесены данные суточных измерений NEE в отдельных камерах автоматизированного комплекса «Flux-NIES». Фактически футпринт мачты ЕС охватывает только четыре камеры комплекса (1-4). Но лучше сравнивать измерения на мачте ЕС с показаниями камер 3-5, т.к. они расположены на мочажине, которая занимает около 80% области футпринта. В основном, выявлено хорошее совпадение потоков  $CO_2$  полученных разными методами в исследуемой экосистеме.

Исследование проводилось в рамках выполнения важнейшего инновационного проекта государственного значения (Соглашение ВИП ГЗ/23-14) с использованием инфраструктуры ИОА СО РАН, включая ЦКП «Атмосфера».

1. Pavelka M., et al. Standardisation of chamber technique for  $CO_2$ ,  $N_2O$  and  $CH_4$  fluxes measurements from terrestrial ecosystems // *Int. Agrophys.* 2018. V. 32. P. 569-587. DOI: 10.1515/intag-2017-0045.

2. Maier M., et al. Introduction of a guideline for measurements of greenhouse gas fluxes from soils using non-steady-state chambers // *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2022. V. 185. P. 447-461. DOI: 10.1002/jpln.202200199.

3. Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. М.: LI-COR Biosciences и ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. 230 с. [Электронный ресурс].

4. Niklas C., et al. Quantitative measurement of combustion gases in harsh environments using NDIR spectroscopy // *J. Sens. Sens. Syst.* 2019. V. 8. P. 123-132.

5. McDermitt D., et al. A new low-power, open-path instrument for measuring methane flux by eddy covariance // *Appl. Phys.* 2011. V. 102. P. 391-405.

6. Maksyutov S., et al. Methane fluxes from wetland in West Siberia during April-October 1998 // *Proc. Seventh Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998.* Tsukuba: Isebu, 1999. P. 115-124.

7. Davydov D.K., Dyachkova A.V., Simonenkov D.V., Fofonov A.V., Maksyutov S.S. Application of the automated chamber method for long-term gas flow measurements in swamp ecosystems of the West Siberia // *Environmental Dynamics and Global Climate Change.* 2021. T. 12, № 1. С. 5-14. DOI: 10.17816/edgcc48700.

## УГЛЕРОД В ФИТОГЕННОМ ПОЛЕ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

*Дюкарев А.Г., Чернова Н.А., Никифоров А.Н., Климова Н.В., Копысов С.Г.*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
dyukarev-ag@mail.ru

Роль лесных экосистем в сохранении углеродного баланса на территории России наиболее значим. Однако имеющие оценки пула углерода, полученные различными группами исследователей существенно, практически на порядок, различаются (от 58 до 429 Мт, что связано с высокой пространственно-временной неоднородностью лесных экосистем. Здесь и региональные различия климата, сукцессионная и сезонная динамика, суточные ритмы, связанная с условиями местоположений пространственная неоднородность, жизненное состояние древостоев. Необходимо отметить и отсутствие единых методик, стандартов на исследование углеродного баланса. Лес - сложная система, включающая компоненты, функционирующие в различных интервалах времени. Так фитосенесценция функционирует в сезонном цикле, древостой в сукцессионном продолжительность которого измеряется сотнями лет, почвенный профиль формируется тысячелетиями. В тоже время почва, на уровне гумусового профиля и водно-температурного режима, реагирует и на менее продолжительны циклы изменчивости.

На территории таёжной зоны Западной Сибири сейчас господствуют леса, находящиеся на разной стадии восстановления. Коренные («зональные») типы леса, сохраняются только небольшими островами, как правило в слабо доступных или природоохраненных территориях. Деграляция лесов чаще всего имеет антропогенную природу, связана с обширными пожарами при земледельческом освоении в начале прошлого столетия и высокими лесохозяйственными нагрузками на последующих этапах.

В настоящее время интенсивно развивается направление по изучению первичной продукции и углеродного баланса как в лесах России, так и лесах других регионов. Оценка проводится преимущественно, на основе оценок древесного яруса, часто без учета почв и напочвенного покрова [1, 2, 3, 4]. Однако динамические процессы, происходящие в лесах, отражаются и проявляются в первую очередь в изменении продуктивности растительных сообществ и активности почвообразования. Так что при исследовании углеродного баланса необходимо учитывать все варианты пространственно-возрастной структуры леса.

*Цель исследований:* выявление закономерностей накопления и баланс углерода в лесных экосистемах с учетом пространственно-временной неоднородностью породного состава древостоя, возрастной структуры и положения в фитогенном поле.

*Объект исследования:* разнотравные пихтовые леса на юге таёжной зоны Западной Сибири находящиеся на разных стадиях деградации и восстановления. Формируются «пихтачи» на оподзоленных почвах. Особенностью почв является высокая контрастность профиля с осветленным элювиальным горизонтом, позволяющим отслеживать изменения активности гумусово-аккумулятивного процесса в сукцессионных циклах.

*Метод исследований:* комплексный биогеоценотический анализ, включающий сопряженное описание почв и напочвенного покрова в местообитаниях, ранжированных по состоянию древостоя и его положению в восстановительно-возрастном ряду. Исследования проводились в однотипных по рельефу условиях с учетом фитогенного поля древостоя (приствольная, подкروновая и межкروновая части).

*Результаты исследования:* Лесные экосистемы на юге таежной зоны Западной Сибири являются важным источником информации, необходимой для понимания циклично развивающихся природных процессов на всех уровнях организации экосистемы. Для



изучения пространственно-временной неоднородности лесных экосистем нами были выбраны разнотравные пихтовые леса Томь-Яйского междуречья, формирующиеся в простых сукцессионных циклах со сменой эдификаторов. Для этой территории характерно достаточно быстрое протекание восстановительных сукцессий. Предельный возраст пихты 80-120 лет, а осины 50-60 лет. Общая продолжительность сукцессионного цикла в естественных условиях немногим превышает 200 лет.

Отличительной чертой пихтовых лесов Томь-Яйского междуречья является высокая пространственная неоднородность с постоянным обновлением структуры насаждений, образованием более или менее крупных окон на месте выпавших деревьев (одного или группы) и их быстрое зарастание разнотравным осинником. Формирующаяся пространственная неоднородность в древостое динамична во времени, проявляется в напочвенном покрове и гумусовом профиле почв (табл. 1) Пространственно-временные стадии эндогенной сукцессии пихтовых лесов исследуемой территории можно выстроить в следующий ряд: окно с высокотравным покровом, осинник разнотравный, осинник с хорошо выраженным вторым пихтовым ярусом разнотравный, субклимаксовый пихтовый лес с разреженным разнотравным покровом, распадающийся пихтарник с высокотравными окнами и густой молодой мертвопокровный, формирующийся в осветленных местоположениях пихтарник. При этом обращает внимание тот факт, что при высоком видовом разнообразии растительных сообществ, образующих этот ряд, они имеют монодоминантный травяной покров, в составе которого принимает участие небольшое число видов. С формированием древостоя и развитием кроны в лесу происходит дифференциация поверхности по уровню солнечной освещенности и водно-температурного режима что отражается в продуктивности фитоценоза.

**Таблица 1. Сукцессионная динамика продуктивности фитоценоза и гумуса почв (кг/м<sup>2</sup>).**

Тип леса	Надземная фитомасса	Подземная фитомасса	Масса подстилки	Гумус в 0.5 м слое почв
Разнотравное окно	3,57	0,12	0,01	21,6
Осинник разнотравный	0,65	0,21	0,14	10,2
Осиново-пихтовый лес	0,58	0,19	0,24	17,3
Пихтовник разнотравный	0,14	0,09	0,30	15,7
Пихтовник мертвопокровный	0,04	0,01	0,40	19,3

Характерными чертами субклимаксовых пихтовых лесов являются разновозрастная структура древостоев с высокой сомкнутостью крон, колеблющейся в пределах 0,6-0,8, а также разреженный разнотравный напочвенный покров. Высокая сомкнутость древесного полога оказывает существенное влияние на подчиненные ярусы, препятствуя формированию густого травяного покрова. По достижении сенильного возраста начинается локальный распад коренного древостоя. Из-за гибели старых пихт, чаще всего при сломе, образуются небольшие (в 1-3 дерева) окна, в которых формируются высокотравные фитоценозы с густым двухъярусным травяным покровом. Для стадии характерна максимальная освещенность и более высокая прогреваемость, что способствует появлению в составе фитоценозов высокотравья, повышению продуктивности, накоплению гумуса. В целом, стадия высокотравного окна весьма непродолжительна и уже через несколько лет по краям окна начинает появляться пихтовый и осиновый подрост и, по мере развития древесного яруса, формируются разнотравные осинники. В условиях все еще достаточной освещенности также формируется густой травяной покров, в котором абсо-

лютно доминирует сныть обыкновенная. Высокое сходство с описанными выше разнотравными осинниками имеют осиново-пихтовые разнотравные леса, в которых формируется хорошо выраженный второй ярус древостоя из пихты сибирской. Вследствие этого происходит значительное снижение проективного покрытия травостоя (около 50%) при сохранении остальных качественных и количественных характеристик подпологовых ярусов. В условиях, наиболее благоприятных для пихтового возобновления (чаще всего на опушке леса), формируются густые мертвопокровные пихтовые молодняки (возраст 20–40 лет). Очень высокая сомкнутость крон (0,8–0,9) здесь приводит к почти полному отсутствию подпологовой растительности. Снижение обилия травянистых растений по мере формирования пихтового второго яруса древостоя в осиново-пихтовых разнотравных лесах, проявляется в четырехкратном уменьшении надземной фитомассы (с 200–300 до 50–60 г/м<sup>2</sup>). В молодых пихтарниках, где практически не развит напочвенный покров, надземная фитомасса крайне мала и составляет всего 0,4 г/м<sup>2</sup>.

Изменения в растительном покрове естественным образом отражаются на почвообразовании, прежде всего накопление органического вещества как на поверхности (подстилки), так и в профиле почв (гумуса) (табл.2). При смене сукцессионных стадий, в поверхностных органогенных горизонтах отмечаются, прежде всего, изменение в структуре лесных подстилок. Типичная для пихтовых лесов хвойный тип подстилки меняется на листовенно- травяную, минерализация которой протекает значительно быстрее. Практически к началу следующей вегетации опад на поверхности почв гумифицируется. В окнах под травяными осинниками активизируется гумусонакопление. В два раза увеличивается мощность гумусового горизонта (с 5–7 до 14–15 см) и запасы гумуса. Трансформируются и другие лабильные показатели (рН, сумма обменных оснований и подвижных элементов, в меньшей степени консервативные свойства).

**Таблица 2. Запасы гумуса в почвах на разных стадиях сукцессии кг/м<sup>2</sup>.**

Стадия	Органогенный	Минеральный	Сумма
Окно высокотравное	5,1	14,5	19,6
Осинник разнотравный	2,6	13,4	16,0
Осиново-пихтовый лес	2,7	9,7	12,4
Пихтовник разнотравный	4,1	6,4	10,4
Пихтовник мертвопокровный	5,3	13,5	18,8

В ходе сукцессионной динамики коренных темнохвойных лесов происходит закономерное изменение запасов углерода, как в подстилочных, так и в минеральных горизонтах почвенного профиля. Общие запасы гумуса в слое 0–50 см существенно варьируют в зависимости от стадий трансформации. На стадии развала древостоя в окнах наблюдается пополнение запаса гумуса, которое достигает максимума - 19,6 кг/м<sup>2</sup>. На следующих стадиях, вплоть до выхода коренных темнохвойных пород в полог осинового леса, органогенные горизонты гумифицируются и минерализуются, а запасы гумуса снижаются. В молодых мертвопокровных пихтовниках отмечается резкое увеличение запаса гумуса в слое 0–50 см, что может быть связано с накоплением гумуса на предшествующих стадиях травяного окна, увеличением мощности дернового горизонта и подстилки в целом. На начальных стадиях возобновления запасы гумуса в горизонтах подстилки, характеризуются незначительными величинами, редко превышающими 2–3 кг/м<sup>2</sup>, при существенной доле участия почвенного гумуса, превышающего запасы в подстилке почти в 10 раз. На финальной стадии восстановления пихтового леса значения запасов гумуса в органогенной и минеральной толщах близки к значениям, характеризующим стадию начала трансформации.

Выявлены различия содержания углерода в фитогенном поле разных типов древостоев: приствольной, под кроновой и меж кроновой частях. Причем максимальное накопление отмечено в производных лиственных лесах (березовых и осиновых минимальное - в пихтовых (табл. 3). Продуктивность фитоценоза в окнах хвойных древостоев различается незначительно, а вот под кроной пихты и ели, при недостатке света и худшей прогреваемости, продуктивность фитоценоза снижается в 2 и более раз, соответственно снижается и накопление углерода в почвах. В приствольной же части темнохвойных древостоев отмечается формирование наиболее мощных лесных подстилок с замедленным процессом минерализации. Так в приствольной части кедра формируются лесные подстилки мощностью 15-и более сантиметров.

**Таблица 3. Углерод в фитогенном поле различных типов древостоя кг/м<sup>2</sup>.**

Тип леса	фитоценоз		почва		
	под кроной	окно	приствольн.	под кроной	окно
Березняк	96	147	-	18,1	17,1
Пихтовник	40	85	18,9	20,3	24,5
Кедровник	73	82	18,4	18,2	26,2
Сосняк	38	78	21,3	28,4	27,0
Осинник	148-170		145-190		

Таким образом, исследования, проведенные в «квазиравновесных» пихтовых лесах Томь-Яйского междуречья, позволили выявить высокую неоднородность распределении в пространстве и времени распределения углерода, что необходимо учитывать в мониторинге процессов углеродного баланса. Показано, что мозаично-ярусное строение лесной экосистемы - циклично развивающийся природный процесс прохождения древостоем разных этапов и стадий Деградация древостоя приводит к развитию напочвенного покрова и накоплению углерода в почвах. Выявлены различия по накоплению углерода в фитогенном поле различных древостоев: приствольной части, подкроновой и окне, что также нужно учитывать при построении различного типа «углеродных моделей». Ведущими факторами неоднородности углеродного баланса является нарушение древостоя, что приводит к изменению инсоляционного и гидротермического режимов на поверхности и, соответственно, скорости и интенсивности биологических процессов. При нарушении естественного цикла восстановления может затягиваться на неопределенно долгое время.

Работа выполнена в рамках деятельности научно-образовательного Центра мониторинга климатически-активных веществ (углерод в экосистемах: мониторинг).

1. Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 573 с.

2. Уткин А.И. Исследования по первичной биологической продуктивности лесов в СССР // Лесоведение, 1970. № 3. С. 58-89.

3. Углерод в экосистемах лесов и болот России / ред. Алексеев В.А., Бердси Р.А. Красноярск: ТОО ЭКОС, 1994. 224 с.

4. Аккумуляция углерода в лесных почвах и сукцессионный статус лесов / под ред. чл.-корр. РАН Н.В. Лукиной. Москва: Товарищество научных изданий КМК. 232 с.

## МОНИТОРИНГ КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (НА ПРИМЕРЕ БОЛОТА МУХРИНО)

*Дюкарев Е.А.<sup>1,2,3</sup>, Дмитриченко А.А.<sup>2</sup>, Заров Е.А.<sup>2</sup>, Кулик А.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск,  
egor@imces.ru

<sup>2</sup>Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

<sup>3</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

Натурные исследования характеристик микроклимата болотных экосистем, включая составляющие теплового и радиационного баланса и углеродного обмена были организованы на научно-исследовательской полевой станции "Мухрино" (Alekseychik et al., 2017; Dyukarev et al., 2022).

Полевая станция "Мухрино" расположена в центральной части Западной Сибири в биоклиматической зоне средней тайги, в 20 км к юго-западу от города Ханты-Мансийска, на второй террасе левого берега реки Иртыш (недалеко от слияния с рекой Обь). Район исследований расположен в северо-восточной части комплекса нетронутого болота Мухрино, общая площадь которого составляет ~75 км<sup>2</sup>. Обширная территория к юго-западу представлена торфяными и озерными ландшафтами Кондинской низменности, перемежающимися с лесами вдоль рек. Территория полевой станции "Мухрино" занимает ~1 км<sup>2</sup>, обеспечена системой деревянных мостков длиной ~2 км, комплексом энергоснабжения (солнечные батареи и ветрогенератор) и площадками постоянного гидрометеорологического мониторинга и мониторинга биоразнообразия различных элементов болотных экосистем.

Климатические условия в районе расположения станции являются континентальными со среднегодовой температурой  $-0.5 \pm 1.2^\circ\text{C}$ , среднемесячные температуры июля  $+18.1^\circ\text{C}$ , января  $-19.4^\circ\text{C}$  (средние многолетние значения за 1991-2021). Общее количество осадков составляет  $547 \pm 98$  мм, из которых 1/4 приходится на снег (~126 мм). Таяние снега начинается в конце апреля и значительно повышает уровень воды в болоте. В течение летнего сезона уровень воды медленно понижается с кратковременным повышением в ответ на выпадение осадков. Сток полностью прекращается в конце октября - начале ноября, когда появляется постоянный снежный покров.

В 2020 г. на грядово-мочажинном комплексе болота Мухрино была установлена мачта с оборудованием для получения непрерывных данных экосистемного масштаба по обмену парниковыми газами и потоками энергии с помощью метода турбулентных пульсаций (eddy-covariance - EC). На мачте на высоте 7 м размещены газоанализаторы CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O LI-7200 и CH<sub>4</sub> LI-7700 (Licor Biogeosciences, США) и ультразвуковой анемометр uSonic-3 Cage MP (Metek, Германия).

По результатам экспериментальных исследований изучена суточная и годовая динамика потоков углекислого газа грядово-мочажинного болотного комплекса болота Мухрино. Данные наблюдений обрабатывались в программном обеспечении EddyPro (LI-COR Inc., USA) с применением стандартных поправок (Burba, 2013) и постобработки с помощью пакета REddyProc (Wutzler et al., 2018).

В летние месяцы явно выражен суточный ход содержания CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в воздухе. В ночные и утренние часы при снижении скорости ветра и интенсивности турбулентного перемешивания парниковые газы накапливаются в приземном слое. Время наступления утреннего максимума в течение вегетационного периода смещается с 2 ч ночи в мае, 4 ч ночи в июне на 6 ч утра в августе. Отношение смеси (mixing ratio) CO<sub>2</sub> в 6 ч утра в августе возрастает до  $449 \pm 51$  ppm. В сентябре суточный максимум имеет меньшую величину

( $406 \pm 11$  ppm), чем летом и приходится на 2- 6 ч ночи. Абсолютный максимум  $\text{CO}_2$  составляет 557 ppm и был зафиксирован 3 августа 2022 г. Эффективное поглощение углекислого газа растительностью в дневное время приводит в тому, что днем содержание  $\text{CO}_2$  снижается и минимальное значение ( $380 \pm 4$  ppm) приходится на 15 ч местного времени в августе и 18 ч в июле. Минимум  $\text{CO}_2$  (373 ppm) приходится на 19:00 25 июля 2022 г. В ноябре –апреле суточные вариации  $\text{CO}_2$  не превышают нескольких ppm, а средние месячные концентрации составляют 402 – 413 ppm.

Содержание метана в приземном воздухе также увеличивается в ночные часы летом. Отношение смеси  $\text{CH}_4$  возрастает до  $2.6 \pm 0.5$  ppm в 5 ч утра в июне и  $4 \pm 1.6$  ppm в 6 ч утра в августе. В летние месяцы после полудня (к 14-16 ч) содержание  $\text{CH}_4$  снижается до 2.2 ppm. Зимой суточный ход метана слабо выражен, средние концентрации составляют 2.2-2.4 ppm. В отдельные моменты времени летом наблюдаются резкие увеличения содержания метана до 5-7 ppm. В 2022 г. подобные эпизоды зафиксированы в ночные часы 7-8, 18-22 июля и 3-8 августа.

Содержание водяного пара, в отличие от содержания  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  не имеет явного суточного хода во все сезоны. Отношение смеси паров воды в течение года увеличивается с  $3.1 \pm 1.1$  ‰ в январе до  $16.1 \pm 4.0$  ‰ в июле-августе.

Потоки углекислого газа, метана и воды с поверхности болота демонстрируют значительную временную изменчивость. Хотя обработка высокочастотных данных и расчет получасовых потоков обычно включает шаги по удалению скачков из мгновенных измерений, скачки также существуют в получасовых данных. После удаления пиковых значений стандартное отклонение, рассчитанное для всего временного интервала уменьшилось на 31% для потока  $\text{CO}_2$  и на 44% для потока  $\text{CH}_4$ .

Суточный ход эмиссии метана проявляется только в теплое время года. Наибольшие потоки  $\text{CH}_4$  наблюдаются в июле в 5 ч утра ( $0.11 \pm 0.05$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ ), в 16 ч ( $0.09 \pm 0.02$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ ) и в августе в 16 ч ( $0.1 \pm 0.04$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ ). Ночью летом эмиссия снижается до значений около  $0.02$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ . С октября по апрель интенсивность выделения метана составляет  $0.01$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ . В период с 30 апреля по 5 мая 2022 г. наблюдается увеличение потока метана в дневное время, вероятно связанное с очаговым разрушением сезонно-мерзлого слоя и выделением метана, аккумулированного за зиму под слоем льда. Пиковые значения выбросов  $\text{CH}_4$  достигают  $0.16$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$  весной и  $0.3$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$  летом.

С октября по апрель станция регистрировала незначительные потоки углекислого газа интенсивностью не более  $0.4$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ . В апреле скорость эмиссии возрастает до  $1.0$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ , а в отдельные дни в светлое время суток наблюдается поглощение  $\text{CO}_2$  с интенсивностью до  $0.3$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ , что свидетельствует о раннем начале фотосинтеза сосны болотной. С мая по сентябрь в дневное время, как правило, регистрируется поглощение углекислого газа экосистемой. Интенсивность фотосинтеза болотной растительностью (GPP – gross primary production) преобладает над экосистемным дыханием. Интенсивность чистого экосистемного обмена (NEE) в дневные часы в мае составляет  $-1.5 \pm 0.6$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ , к июлю она возрастает до  $-5.0 \pm 0.8$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$ , а к сентябрю снижается до  $-1.8 \pm 0.9$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$  (рис. 1). В ночные часы регистрируемый поток  $\text{CO}_2$  положительный и составляет экосистемное дыхание (ER – ecosystem respiration), которое увеличивается с  $+0.6 \pm 0.4$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$  в мае до  $+2.3 \pm 1.2$   $\mu\text{моль}/\text{м}^2/\text{с}$  в августе.

Суммарный экосистемный обмен с 1 октября 2021 г. по 30 сентября 2022 г. оценен в  $-82.8$  гС  $\text{м}^{-2}$ . Значимое поглощение углерода в болотной экосистеме зарегистрировано с мая по август. Всего за теплый период кумулятивный NEE составил  $-114.8$  гС  $\text{м}^{-2}$ . В октябре при снижении интенсивности фотосинтеза, но еще больших значениях экоси-



стемного дыхания, суммарный экосистемный обмен становится положительным. С октября по апрель болото является источником углерода с интенсивностью от 3.5 до 5.9 гС м<sup>-2</sup> в месяц.

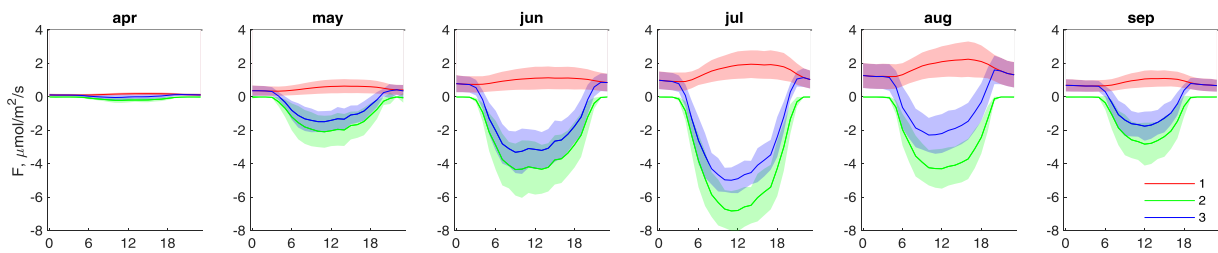


Рисунок 1. Средний суточный ход потоков углекислого газа на грядово-мочажинном комплексе болота Мухрино в 2022 г.

В период с 1 октября 2021 г. по 30 сентября 2022 г. суммарное испарение оценено в 304 мм, что составило 40 % от Р (507 мм). За теплый период 2022 г (май-август) выпало 172 мм или 34 % от годовой суммы осадков. Испарение за теплый период 2022 г (249 мм) вносит основной вклад (82%) в годовое испарение. В июле 2022 г. сумма осадков составила всего 7 мм (или 11 % от многолетней месячной нормы), вследствие чего в целом за теплый период испарение превышало Р. Соотношение Боуэна в 2022 г. было 50 и 38% для теплого периода и всего года, соответственно. Преобладание LE над H характерно для северных болот (Shimoyama et al., 2003).

В 2023 г. на полигоне Мухрино установлены еще две вышки для организации измерений потоков парниковых газов. 14 м вышка на участке сосново-кустарничково-сфагнового болота и 43 м вышка над пологом смешанного леса.

1. Alekseychik, P.; Mammarella, I.; Karpov, D.; Dengel, S.; Terentieva, I.; Sabrekov, A.; Glagolev, M.; Lapshina, E. Net ecosystem exchange and energy fluxes measured with eddy covariance technique in a West Siberian bog. *Atmos. Chem. Phys.* 2017, 17, 9333-9345. doi: 10.5194/acp-2017-43.

2. Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications. Lincoln: LI-COR Biosciences, 2013. 331 p.

3. Dyukarev E., Zarov E., Alekseychik P., Nijp J., Filippova N., Mammarella I., Filippov I., Bleuten W., Khoroshavin V., Ganasevich G., Meshcheryakova A., Vesala T., Lapshina E. The multiscale monitoring of peatland ecosystem carbon cycling in the middle taiga zone of Western Siberia: the Mukhrino bog case study // *Land* 2021, 10(8), 824; <https://doi.org/10.3390/land10080824>.

4. Shimoyama K., Hiyama T., Fukushima Y., Inoue G. Seasonal and interannual variation in water vapor and heat fluxes in a West Siberian continental bog // *Journal of Geophysical Researches-Atmosphere*. 2003. Vol. 108, P. 4648. doi: 10.1029/2003jd003485.

5. Wutzler T., Lucas-Moffat A., Migliavacca M., Knauer J., Sickel K., Šigut L., Menzer O., Reichstein M. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc // *Biogeosciences*. 2018. Vol. 15, P. 5015–5030.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННОГО КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА В ТУНДРОВЫХ И ЛЕСОТУНДРОВЫХ ЭКОСИСТЕМАХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

*Завалишин Н.Н., Голубятников Л.Л., Александров Г.Г.*

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, nickolos@ifaran.ru,  
golub@ifaran.ru, gleb@ifaran.ru

В связи с усиленным по сравнению с другими территориями потеплением климата в арктической зоне России исследование реакции на них тундровых и лесотундровых экосистем, занимающих ее основную площадь, приобретает большую актуальность. Объективный недостаток измерений компонентов круговорота углерода на обширных северных территориях с холодным климатом порождает необходимость математического моделирования современных значений запасов и потоков с целью оценки масштабов углеродного обмена в системе атмосфера-суша.

Пулами трех-компарментальной модели углеродного цикла в тундровых и лесотундровых экосистемах являются содержания углерода в живой фитомассе ( $C_1$ ), в мертвой фитомассе (подстилка, мертвые корни, дубрис) ( $C_2$ ), в органическом веществе почвы (гумусовые вещества) ( $C_3$ ) (рис. 1). Источником данных по круговороту в опорной экосистеме круговорота углерода в мохово-кустарничковой тундре (рис. 1) является статическая схема из работы (Базилевич и Гильманов, 1985). Животные-потребители фитомассы и организмы-деструкторы мертвого органического вещества отнесены к окружающей среде, и поэтому связанные с их жизнедеятельностью потоки учитываются опосредованно. Пул полной фитомассы  $C_1$  поглощает углекислый газ атмосферы в ходе фотосинтеза, выделяет его в ходе автотрофного дыхания, и их разность составляет чистую первичную продукцию (NPP). Она распределяется между приростом фитомассы, поглощением и отчуждением её растительноядными животными (выходной поток  $y_1$ ), опадом и отпадом (поток  $f_{12}$ ). Выходные потоки пула мертвой фитомассы  $C_2$  состоят из гетеротрофного дыхания ( $y_{21}$ ) и экспорта в соседние экосистемы ( $y_{22}$ ). Посредством потока  $f_{23}$  обеспечивается транспорт органики из органических остатков разных типов в гумусовые соединения  $C_3$ . Поток  $q_2$  обозначает пополнение содержания углерода в резервуаре мертвой фитомассы за счет выпадения из атмосферы и переноса из соседних экосистем. Аналогично для пула органического вещества почвы: выходные потоки гетеротрофного дыхания ( $y_{31}$ ) и экспорта в соседние экосистемы ( $y_{23}$ ) компенсируются транспортом органического вещества из пула мертвой фитомассы и входным потоком  $q_3$ , который характеризует внос органического вещества почвы из других экосистем. Балансовая динамическая модель круговорота углерода для этой схемы имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = NPP - y_1 \\ \frac{dC_2}{dt} = q_2 + f_{12} - y_{21} - y_{22} - f_{23} \\ \frac{dC_3}{dt} = q_3 - y_{31} - y_{32} + f_{23}C_2 \end{cases} \quad (1)$$

Для получения современных значений запасов и потоков углерода в тундровых и лесотундровых экосистемах точечная модель круговорота углерода типа (1) строится для каждой ячейки на пространственной сетке с разрешением  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  по широте и долготе.

В качестве начального принимается момент времени 1980 г., соответствующий малонарушенному состоянию экосистем, затем модель численно интегрируется в каждой ячейке пространства до современности.

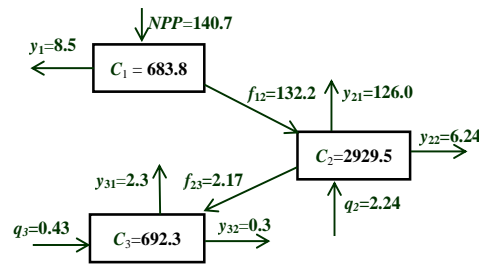


Рисунок 1. Агрегированная до трех пулов статическая схема круговорота углерода в мохово-кустарничковой тундре п-ова Таймыр (Базилевич и Гильманов, 1985) (пулы – гС/м<sup>2</sup>, потоки – гС/м<sup>2</sup>/год).

Каждой ячейке пространственной сетки на картосхеме тундровой и лесотундровой зон российской Арктики приписан тип конкретной тундровой или лесотундровой экосистемы согласно карте растительности (Базилевич, 1993). Для используемого пространственного разрешения составлены два набора данных: биологический и климатический. В состав биологических данных входят начальные пространственные распределения фитомассы, первичной продуктивности, мортмассы и запасов органического вещества почв, подготовленные по данным Н.И. Базилевич (Базилевич, 1993) и Д.С. Орлова (Орлов и др., 1996). Климатический набор образован данными реанализа за период с 1980 по 2018 года для среднегодовой приземной температуры воздуха, годовых сумм осадков, суммарной солнечной радиации, преобразуемой к фотосинтетически активной, минимальной и максимальной температур приземного воздуха, доступных на портале ESGF (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/create-ip>).

Часть потоковых функций зависит от содержания углерода в посылающем пуле линейно (донорный тип потока), что отвечает биологическим представлениям об их функционировании. Донорными потоками являются опад и отпад ( $f_{12}$ ), гетеротрофное дыхание ( $y_{21}$ ,  $y_{31}$ ), потребление и отчуждение фитомассы животными ( $y_1$ ), экспорт в соседние экосистемы со стоком ( $y_{22}$ ,  $y_{32}$ ), транспорт углерода из органических остатков в гумусовые вещества ( $f_{23}$ ). Это значит, что можно принять некоторые из них в линейной форме:  $f_{12} = \alpha_{12}C_1$ ,  $f_{23} = \alpha_{23}C_2$ ,  $y_1 = m_1C_1$ ,  $y_{22} = m_2C_2$ ,  $y_{32} = m_3C_3$ , где коэффициенты могут потенциально зависеть от факторов окружающей среды или хозяйственного воздействия.

Функция продуктивности растительного покрова учитывает влияние количества фотосинтетически активной солнечной радиации (ФАР), среднегодовой температуры приземного воздуха, годовой суммы осадков, фитомассы. Форма этой функции мультипликативна:  $NPP = C_1\varphi_1(C_1, T_a, C_a, H, Q)$ , в которой  $T_a$  – среднегодовая температура приземного воздуха,  $C_a$  – концентрация  $CO_2$  в приземном слое атмосферы в единицах углерода,  $H$  – годовая сумма осадков,  $Q$  – годовая суммарная ФАР. Удельную продуктивность  $\varphi_1(C_1, T_a, C_a, Q)$  можно представить в виде:

$$\varphi_1(C_1, T_a, C_a) = \frac{P_0}{1 + p_1 C_1} \psi_1(C_a, T_a, H) \psi_2(Q), \quad (2)$$

где фактор зависимости от ФАР имеет простую экспоненциальную форму с насыщением (Olchev, 2016):

$$\psi_2(Q) = 1 - \exp(-\beta_R Q). \quad (3)$$

Фактор зависимости от фитомассы взят в простой форме, которая при умножении на  $C_1$  дает монотонную функцию с насыщением. Зависимость от атмосферных факторов задается в мультипликативной форме:

$$\psi_1(C_a, T_a, H) = \frac{k_T (T_a - T_{\min})(T_{\max} - T_a)}{(T_{\max} - T_{\min})^2} C_a k_H (1 - \exp(-\beta_H H)), \quad (4)$$

где  $T_{max}$  и  $T_{min}$  – максимальная и минимальная температуры приземного воздуха, а зависимость от годовой суммы осадков заимствована из (Adams et al., 2004), где параметры равны  $k_H = 1350$ , а  $\beta_H = 2.656$ .

Потоки гетеротрофного дыхания характеризуют интенсивность процессов разложения мертвой фитомассы и гумусовых веществ и зависят не только от среднегодовой приземной температуры воздуха, но и от количества осадков. Зависимость от температуры опирается на экспоненциальное уравнение Аррениуса (Adams et al., 2004), а для осадков взят простейший обратно пропорциональный вариант:

$$\varphi_2(T_a, H) = k_i^D \exp(k_i^a T_a) / H, \quad i = 2, 3. \quad (5)$$

Фактор  $\varphi_2$  действует для потоков  $y_{21}$  и  $y_{31}$  разложения органических остатков и гумусовых веществ.

Результатом сделанного выбора потоковых зависимостей является трех-компарментальная динамическая модель круговорота углерода для каждой пространственной ячейки тундровой и лесотундровой зон:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = C_1 \frac{p_0}{1 + p_1 C_1} \frac{k_T (T_a - T_{min})(T_{max} - T_a)}{(T_{max} - T_{min})^2} C_a k_H (1 - \exp(-\beta_H H)) - (m_1 + \alpha_{12}) C_1 \\ \frac{dC_2}{dt} = q_2 + \alpha_{12} C_1 - m_2 C_2 - \alpha_{23} C_2 - k_2^D C_2 \exp(k_2^a T_a) / H \\ \frac{dC_3}{dt} = q_3 - m_3 C_3 + \alpha_{23} C_2 - k_3^D C_3 \exp(k_3^a T_a) / H \end{cases} \quad (6)$$

Калибровка коэффициентов потоковых функций осуществляется либо делением значений потоков на величины запасов в начальный момент времени для донорных потоков, либо использованием нелинейной регрессии методом наименьших квадратов для нелинейных потоков. Поскольку полный углеродный баланс измерен или оценен только в отдельных немногочисленных географических точках, для нахождения недостающих значений потоков используется условие равновесия в начальный момент времени.

Современное состояние круговорота углерода (запасы в резервуарах и потоки) вычисляется численным интегрированием динамической модели (6) с подстановкой конкретных значений климатических параметров на каждом среднегодовом шаге времени в каждой пространственной ячейке. В ходе имитационных компьютерных расчетов вычислены как меридиональные, так и широтные распределения фитомассы, мортмассы, гумусовых веществ почвы, потоков первичной продуктивности и гетеротрофного дыхания, а также динамика этих величин в каждой пространственной ячейке. Вычисленные по модели (6) пространственные распределения фитомассы, мортмассы и запаса гумуса в почвах тундровой и лесотундровой зон арктической зоны к 2018 г. показывают интегральное увеличение их значений. Распределение фитомассы по параллелям на Европейской территории России (ЕТР) демонстрирует увеличение фитомассы и его сдвиг в высокие широты, что соответствует наблюдаемому «позеленению» тундры. Максимум суммарного увеличения попадает в интервал  $45^\circ$ - $52^\circ$  в.д. и составляет около 20%. В Западной Сибири такой сдвиг также наблюдается, и фитомасса растет в южном направлении, достигая максимума в интервале  $65^\circ$ - $67^\circ$  в.д. Сдвиг повышения фитомассы в более высокие широты выражен слабее в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, чем в Западной Сибири и ЕТР, что обусловлено возрастанием континентальности климата и менее выраженным потеплением на севере Восточной Сибири и Дальнего Востока. Росту фитомассы соответствует увеличение первичной продуктивности (NPP). Наибольшее увеличение продуктивности происходит в диапазоне  $66$ - $75^\circ$  с.ш. и небольшой сдвиг в более высокие широты, менее выраженный, чем для Европейской территории России и Западной Сибири. Распределение по долготе более неоднородно, но увеличение продуктивности не слишком значительно и не превышает  $25$ - $30$  гС/м<sup>2</sup>/год.

Основным потоком деструкционной ветви круговорота углерода является гетеротрофное дыхание, а мортмасса характеризует запас относительно быстроразлагаемого мертвого органического вещества. На ряде территорий происходит уменьшение мортмассы, связанное с увеличением интенсивности разложения мертвого органического вещества подстилки при повышении среднегодовой температуры воздуха. Максимум потери углерода составил  $513$  гС/м<sup>2</sup> на ЕТР. В

Западной Сибири модель показала накопление углерода в подстилке в зоне лесотундры, связанное с увеличением запаса фитомассы и пропорционального ему опада. Меридиональное распределение демонстрирует интегральное уменьшение мортмассы в интервале от 105° в.д. до 120° в.д., соответствующее усиленному разложению подстилки в тундровой зоне от п-ова Таймыр до устья р. Лена в связи с потеплением климата последних десятилетий. Максимум потери углерода составил 680 гС/м<sup>2</sup>, что больше, чем аналогичная величина в Западной Сибири и ЕТР.

На рис. 2 показано пространственное распределение суммарных изменений общего запаса углерода экосистем (фитомасса + мортмасса + органическое вещество почвы) для тундровой и лесотундровой зоны Восточной Сибири и Дальнего Востока за период 1980 – 2018 г.г. Общий запас углерода в экосистемах незначительно уменьшился только в тундрах побережья Таймыра, а на остальных территориях он вырос. В Восточной Сибири прирост оказался выше, чем на севере Дальнего Востока, что может быть связано с различием в поступлении ФАР, которая на Чукотке стала меньше, а на севере Восточной Сибири увеличилась. Суммарный прирост углерода в тундровых и лесотундровых экосистемах Восточной Сибири и Дальнего Востока составил 2,3 ГтС за весь изучаемый период.

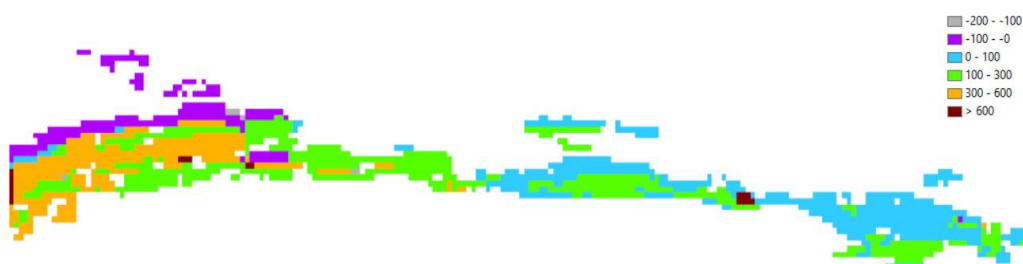


Рисунок 2. Расчетное интегральное изменение общего запаса углерода в тундровых и лесотундровых экосистемах Восточной Сибири и Дальнего Востока РФ за период 1980–2018 гг.

Учитывая географическое распределение запасов углерода, можно сказать, что биологический круговорот без учета антропогенного влияния не претерпел кардинальных изменений, хотя и отражает происходящие климатические изменения. Созданная динамическая модель, потоковые функции которой зависят как от соответствующих запасов в пулах модели, так и от факторов окружающей среды, адаптирована для расчетов на пространственной широтно-долготной сетке.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031–6).

1. Базилевич Н.И., Гильманов Т.Г., Концептуально-балансовые модели экосистем как этап обобщения экологической информации при построении математических моделей. // в сб. «Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем», т. VII, Л., Гидрометеоиздат, 1985, с. 152-178.

2. Базилевич Н.И., Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. – М., Наука, 1993.

3. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И., Органическое вещество почв Российской Федерации – М., Наука, 1996.

4. Olchev A.V., A modeling approach to estimate the gross and net primary production of forest ecosystems as a function of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation. // Computer Research and Modeling, 2016, v. 8, # 2, p. 345-353.

5. Adams B., White A., Lenton T.M. An analysis of some diverse approaches to modelling terrestrial net primary productivity // Ecological Modelling, 2004, v. 177, p. 353-391.

## МОНИТОРИНГ ПОТОКОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ЛЕСНЫХ И БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ НА ЕВРОПЕЙСКОМ СЕВЕРО-ВОСТОКЕ РОССИИ

*Загирова С.В., Мизловец М.Н.*

Институт биологии УрО РАН, г. Сыктывкар, zagirova@ib.komisc.ru

Снижение концентрации парниковых газов в атмосфере Земли рассматривается международным сообществом экспертов по изменению климата как необходимое условие для удержания глобального потепления в текущем столетии. На это направлены мероприятия по защите и повышению качества поглотителей и накопителей парниковых газов. В Российской Федерации основными поглотителями атмосферного углерода признаны леса, которые занимают 45% территории страны, поэтому их сохранение, рациональное использование и восстановление рассматривается как важнейшее условие сдерживания потепления климата. В рамках важнейшего инновационного проекта государственного значения "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ" предлагается создание единой сети тестовых полигонов, что позволит оценить потоки парниковых газов и запасы углерода в наземных экосистемах разных климатических зон.

На европейском северо-востоке России первые исследования экосистемного обмена парниковых газов были проведены на мезо-олиготрофном болоте среднетаёжной подзоны в рамках международного проекта ПРООН/ГЭФ [1]. В последующем мониторинг потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  организован в еловом насаждении на территории лесного заказника «Ляльский» [2], сосновом фитоценозе Печоро-Илычского заповедника [3] и на крупнобугристом болоте в Интинском районе Республики Коми. На данных объектах исследований использованы высокоточные измерительные комплексы для выявления динамики концентрации основных климатически активных газов в приземной атмосфере, скорости и направленности их потоков между экосистемой и атмосферой. Результаты многолетних исследований свидетельствуют о том, что в условиях современного климата ненарушенные лесные и болотные экосистемы Республики Коми характеризуются положительным углеродным балансом. Однако величина поглощенного  $\text{CO}_2$  зависит от структуры и состояния фитоценозов, а также погодных условий в период вегетации.

Наиболее длительный ряд наблюдений за потоками парниковых газов получен в еловом насаждении на территории заказника «Ляльский». В сезонной динамике снижение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе над пологом древостоя на высоте 30 м в бесснежный период связано с функцией его поглощения лесным фитоценозом (рис. 1А). Переход леса от источника к стоку  $\text{CO}_2$  регистрировали в конце апреля-начале мая, значительное снижение концентрации  $\text{CO}_2$  соответствовало периоду активной вегетации. Амплитуда суточных изменений концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе над пологом и в пологе древостоя максимально выражена в июле, снижение содержания  $\text{CO}_2$  наблюдали после восхода солнца в течение дня, как результат фотоассимиляции растений. По мере сезонного роста и развития растений увеличивалось содержание влаги в воздухе над пологом (рис. 1Б), что соответствовало сезонному ходу эвапотранспирации.

Результаты исследования энерго-массообмена таёжных экосистем показали, что еловое насаждение характеризуется более высоким радиационным балансом, чем мезо-олиготрофное болото, и это определяет различие обмена  $\text{CO}_2$  между болотной и лесной экосистемами (рис. 2 А). В ельнике в разные годы суммарный нетто-обмен  $\text{CO}_2$  ( $NEE$ ) в период активной вегетации варьировал от  $-370$  до  $-800$  г  $\text{CO}_2/\text{м}^2$ , значительное снижение стока отмечено при длительном отсутствии осадков и необычно высокой температуре

воздуха в летние месяцы. Суммарный нетто-обмен между болотом и приземной атмосферой в бесснежный период составил от  $-284$  до  $-318$  г  $\text{CO}_2 / \text{м}^2$  [4], межгодовые различия потоков  $\text{CO}_2$  обусловлены количеством осадков и температурой.

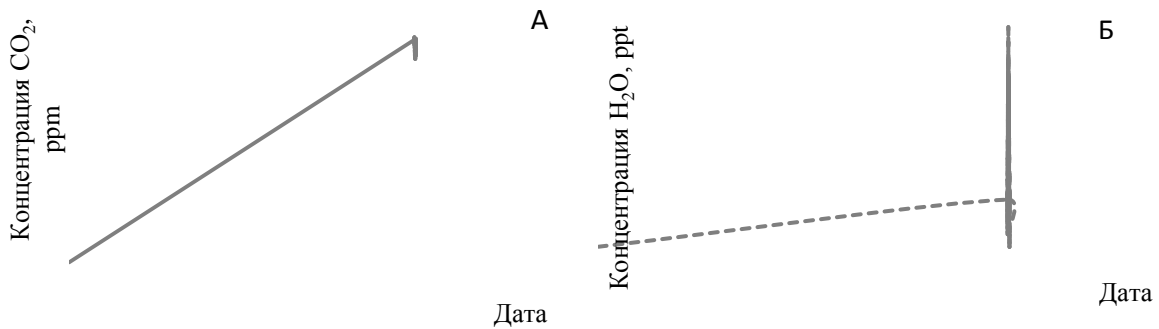


Рисунок 1. Сезонный ход концентрации  $\text{CO}_2$  (А) и  $\text{H}_2\text{O}$  (Б) над пологом елового насаждения.

В ельнике затраты радиационного тепла на испарение влаги составляли 30-90%, суммарное испарение влаги увеличивалось с начала до середины активной вегетации (рис. 2 Б), что могло быть связано с усилением транспирации растений. Затраты на испарение влаги в экосистеме болота максимальны в начале вегетационного сезона и достигали 70% радиационного тепла, поэтому эвапотранспирация в мае-июне в два раза превышала значения, полученные в еловом насаждении. Суммарное испарение с поверхности болота сокращалось в июле по мере снижения уровня болотных вод. В целом же суммарная эвапотранспирация за сезон незначительно различалась между болотом и еловым лесом. В суточной динамике выявлена зависимость между обменом  $\text{CO}_2$  и эвапотранспирацией, эффективность использования воды на gross-фотосинтез составила 2–4 г С/ кг  $\text{H}_2\text{O}$ .

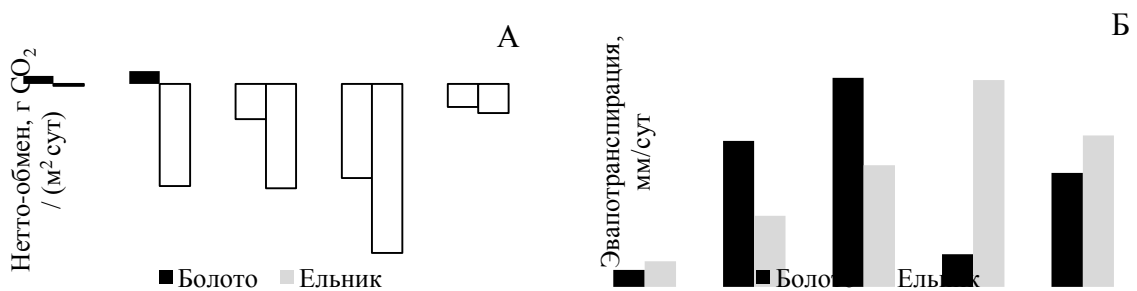


Рисунок 2. Сезонная динамика среднесуточных значений нетто-обмена  $\text{CO}_2$  (А) и эвапотранспирации (Б) в экосистеме мезо-олиготрофного болота и ельника.

В сосняке бруснично-лишайниковом на территории Печоро-Ильчского заповедника баланс  $NEE$  за период вегетации составил около  $-300$  г  $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ , что заметно ниже полученных в тот же год значений в еловом насаждении средней тайги [3]. В этом типе леса gross-фотосинтез тесно связан с  $\Phi AP$  и температурой воздуха. По сравнению с ельником, сосняк характеризовался более низкими затратами радиационного тепла на испарение влаги (от 20 до 60%), соответственно и более низкой эвапотранспирацией. Различие суммарного испарения между еловым и сосновым фитоценозами могло быть обусловлено запасом влаги в почве и индексом листовой поверхности.

Таким образом, установленные нами различия обмена диоксида углерода и влаги в наземных экосистемах характеризуют влияние структуры и состояния растительного покрова на потоки климатически активных газов в приземном слое атмосферы, что важно учитывать при оценке углеродного цикла и водного баланса для крупных таёжных ландшафтов.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

1. Ecosystem of a mesooligotrophic peatland in Northwestern Russia: development, structure, and function. – Syktyvkar, 2016. – 172 p.

2. Zagirova S.V., Mikhailov O.A., Elsakov V.V. Carbon dioxide and water exchange between spruce forest and atmosphere in spring–summer under different weather conditions // Contemporary Problems of Ecology. – 2019b. – Vol. 12. – № 1. – P. 45–58.

3 Zagirova S. V., Mikhailov O. A. Ecosystem exchange of carbon dioxide and water in cowberry lichen pine forest in the middle taiga subzone of eastern Europe // Russian Journal of Ecology. – 2021. – Vol. 52. – № 3. – P. 201-211.

4. Mikhaylov O. A., Zagirova S. V., Miglovets M. N. Seasonal and inter-annual variability of carbon dioxide exchange at a boreal peatland in north-east European Russia // Mires and Peat. – 2019. – Vol. 24, art. 34. – P. 1–16.



## СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА И АЗОТА В КОМПОНЕНТАХ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ В МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ

*Иванова Е.А., Сухарева Т.А., Ершов В.В.*

Институт проблем промышленной экологии Севера, Мурманская обл., г. Апатиты,  
ea.ivanova@ksc.ru

Лесные экосистемы играют ключевую роль в регулировании циклов углерода и газового состава атмосферы, благодаря связыванию растениями  $\text{CO}_2$  в процессе фотосинтеза и аккумуляции углерода в почве, фито- и мортмассе. Наиболее важными природными факторами, определяющими варьирование циклов углерода и азота в лесных экосистемах Мурманской области, являются особенности климата, рельефа, почвы и почвообразующих пород, растительности и биоты. Короткий вегетационный период, недостаток тепла, повышенная кислотность лесной подстилки ограничивают продуцирование органического вещества и активность организмов-деструкторов, что приводит к снижению темпов разложения мортмассы, интенсивности и емкости биогеохимического круговорота. Мурманская область – один из самых промышленно развитых регионов Арктики, на территории которого функционируют крупные предприятия горнопромышленного и металлургического комплексов. Техногенное загрязнение изменяет состав лесов, возраст и полноту древостоя, сомкнутость крон деревьев, качество опада доминирующих видов растений, активность почвенной фауны и микобиоты, что приводит к нарушениям экосистемных функций лесов, влияет на циклы углерода и элементов минерального питания, плодородие почв, продуктивность экосистем.

Цель исследований – оценить содержание углерода и азота в лесных экосистемах Мурманской области в условиях комбинированного действия природных и антропогенных факторов.

Оценку содержания углерода и азота в компонентах лесных экосистем проводили на основе анализа литературных данных, а также многолетних (1991-2022 гг.) данных ИППЭС КНЦ РАН по концентрациям С и N в атмосферных осадках, почвенных водах, почвах, древесном опаде, листьях/хвое растений в сосновых и еловых лесах Мурманской области. Содержание углерода и азота определялось в почвенных водах и атмосферных осадках (дождь и снег) методом хроматометрии или перманганатометрии, в зависимости от концентрации. В почвенных и растительных пробах углерод определялся методом Тюрина, азот – методом Кьельдаля.

Большинство биохимических реакций в почвах происходит в почвенном растворе, химический состав которого служит индикатором воздействия различных факторов на лесные экосистемы (Яшин и др., 2003). Источники растворенного органического углерода в почвах – подстилка, гумус, корневые выделения растений, атмосферные осадки (дождь и снег), биогенные (пыльца, растительные остатки, бактерии и вирусы) и антропогенные осадки (сажа, пыль) (Bolan et al., 2011; Schulze et al., 2011). Исследования показали, что как в фоновых еловых и сосновых лесах, так и в лесах под воздействием промышленного загрязнения, концентрации и выпадения соединений углерода из атмосферы и вынос его с почвенными водами в подкروновых пространствах выше, чем в межкروновых, что связано со смывом и выщелачиванием соединений элементов из крон деревьев, опада и почв (Лукина, Никонов, 1998; Лукина и др., 2008). В дефолирующих лесах и техногенных редколесьях, по сравнению с фоном, обнаружено снижение концентраций, выпадений из атмосферы и выноса с почвенными водами углерода, что объясняется снижением количества опада из-за ухудшения состояния и гибели деревьев (Ершов, 2021; Ershov et al., 2022).

Сложное сочетание природных и антропогенных факторов определяет высокую вариабельность содержания и запасов углерода в почвах, фито- и мортмассе. Подзолы северотаежных лесов Мурманской области имеют малую мощность органогенного горизонта и небольшие запасы органического вещества, низкое содержание азота и гумуса в минеральных горизонтах (Переверзев, Алексеева, 1980; Переверзев, 2004). Для подзолов характерно бимодальное распределение гумуса по профилю с максимумами в органогенных и иллювиальных горизонтах. Содержание углерода в органогенном горизонте почв еловых и сосновых лесов варьирует от 12 до 57 %, валовое содержание азота – от 8 до 16 г/кг, показатель C:N превышает 30, что свидетельствует о недостатке азота в органическом веществе подстилок (Лукина и др., 2008).

Анализ многолетних данных (1991-2019 гг.) химического состава растений выявил видовые особенности в содержании элементов и показал, что в ненарушенных лесах содержание углерода в хвое ели и сосны варьирует от 41 до 68%, азота – от 8.0 до 15.0 г/кг; в листьях березы углерода содержится 45-56%, азота – 19.3-23.3 г/кг (Сухарева, 2017). Вечнозеленые кустарнички являются одними из доминантов напочвенного покрова северотаежных лесов и принимают активное участие в процессах миграции и трансформации соединений. В листьях вороники содержание углерода варьирует в пределах 54-66%, у брусники – 48-52%; в листьях разного возраста содержание углерода практически не изменяется. При этом содержание азота в листьях текущего года выше, чем в многолетних листьях: для вороники оно варьирует от 8.4 г/кг в многолетних до 14.5 г/кг в листьях текущего года, для брусники – от 7.1 г/кг до 16.8 г/кг, соответственно (Сухарева, 2022). В условиях техногенного загрязнения в листьях и хвое деревьев и растений напочвенного покрова увеличивается содержание углерода по сравнению с фоновой территорией, что связано с активным синтезом вторичных метаболитов (Лукина и др., 2005; Сухарева, 2022).

Важным компонентом лесных экосистем является надземный опад древесных растений – источник органического вещества почв и элементов питания для биоты. Размеры и структура опада зависят от изменчивости погодных условий, состава и мозаичности древостоя, годовичного прироста деревьев, их возраста, регулируя в свою очередь накопление углерода, циклы элементов в экосистемах. Исследование многолетних данных (1995-2022 гг.) показало, что общая масса древесного опада в сосновых лесах на северном пределе распространения уменьшается при усилении влияния аэротехногенного загрязнения с 0.66 т/га в фоновых условиях до 0.53 т/га в техногенных редколесьях, при этом увеличивается поступление опада хвои под кронами деревьев. Исследование химического состава опада (2014-2017 гг.) показало, что содержание углерода в опаде хвои сосны в сосновых лесах на фоновых и нарушенных техногенным загрязнением территориях составило 56-57%, содержание азота – 3.2-3.6 г/кг, уменьшаясь при приближении к источнику загрязнения (Иванова и др., 2022).

Исследование данных по пулам и потокам углерода и азота в наземных экосистемах Мурманской области продемонстрировало особенности поступления углерода и азота с атмосферными осадками и опадом. Результаты анализа подтвердили дефицитность содержания азота в хвое деревьев и показали снижение активности в накоплении углерода растениями в условиях техногенной нагрузки, что может впоследствии приводить к снижению депонирования его почвами. Дальнейшие исследования важны для совершенствования методологии оценки циклов углерода и азота и устойчивого управления наземными экосистемами Арктики в условиях воздействия экстремальных природных и антропогенных факторов.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга

пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

1. Ершов В. В. Фитогенное варьирование состава атмосферных выпадений и почвенных вод северотаежных лесов в условиях аэротехногенного загрязнения: Дисс. ... канд. биол. Наук (спец. 1.5.15.). Апатиты, 2021. 188 с.

2. Иванова Е.А. Формирование и разложение древесного опада в сосновых лесах на северном пределе распространения при аэротехногенном загрязнении: Дисс. ... канд. биол. наук (спец. 06.03.02.). Москва-Апатиты, 2022. 114 с.

3. Лукина Н.В., Никонов В.В. Питательный режим лесов северной тайги: природные и техногенные аспекты. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1998. 316 с.

4. Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 342 с.

5. Переверзев В.Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.

6. Переверзев В.Н., Алексеева Н.С. Органическое вещество в почвах Кольского полуострова. Л., Наука, 1980. 227 с.

7. Сухарева Т.А. Особенности накопления химических элементов древесными растениями северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 438–441.

8. Сухарева Т.А. Химический состав дикорастущих кустарничков северотаежных лесов на фоновых и техногенно нарушенных территориях // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 351–356.

9. Яшин И.М., Раскатов В.А., Шишов Л.Л. Водная миграция химических элементов в почвенном покрове. М.: Изд-во МСХА, 2003. 316 с.

10. Bolan N.S., Adriano D.C., Kunhikrishnan A., James T., McDowell R., Senesi N. Dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils // *Advances in Agronomy*. 2011. V. 110. P. 1–75.

11. Ershov V., Sukhareva T., Isaeva L., Ivanova E., Urbanavichus G. Pollution-induced changes in the composition of atmospheric deposition and soil waters in coniferous forests at the northern tree line // *Sustainability* 2022. V. 14. Iss. 23. Article id 15580. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/15580> (Дата обращения: 28.08.2023)

12. Schulze K., Borken W., Matzner E. Dynamics of dissolved organic  $^{14}\text{C}$  in throughfall and soil solution of a Norway spruce forest // *Biogeochemistry*. 2011. V. 106. N. 3. P. 461–473.

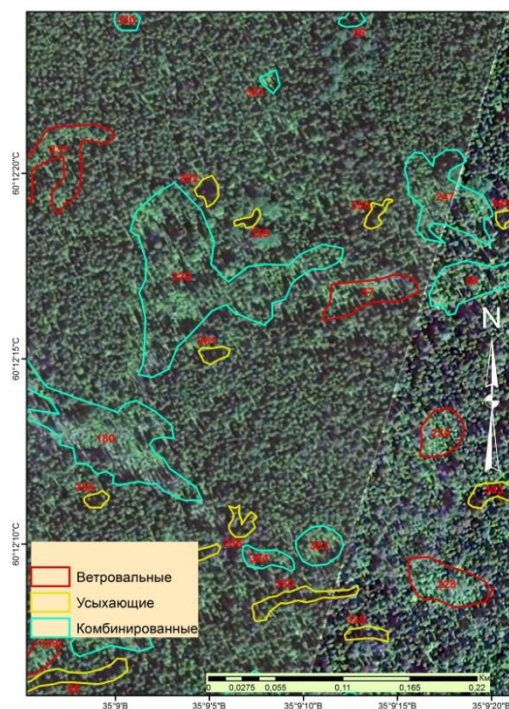
## **КРУПНЫЕ ДРЕВЕСНЫЕ ОСТАТКИ В ЛЕСАХ С ВЫРАЖЕННОЙ ВЕТРОВАЛЬНОЙ ДИНАМИКОЙ: РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ПУЛОВ И ПОТОКОВ УГЛЕРОДА**

*Капица Е.А., Шорохова М.А., Шорохов А.А., Данилов Г.А., Коретин А.А., Тетюхин С.В.*  
Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени  
С.М. Кирова, kapitsa@list.ru

Крупные древесные остатки (КДО) – сухостой, валеж, зависшие стволы, пни и крупные ветви и корни диаметром более 6 см - играют ключевую роль в функционировании таежных лесов. Оценки пулов углерода КДО лесов России фрагментарны, и в основном получены для лесов Европейской части страны без учета естественных нарушений – пожаров, ветровалов, вспышек размножения насекомых, рубок леса. Недостаток данных о потоках углерода в связи с разложением КДО ограничивает наши возможности оценки роли КДО в круговороте углерода (Шорохова, 2020; Shvidenko et al., 2022).

Цель данного исследования: анализ variability пулов углерода КДО и потоков в связи с их разложением после нарушений - ветровала, бурелома и куртинного усыхания древостоя - различных давности и интенсивности в коренных среднетаежных лесах на примере резервата «Вепсский лес». В связи с поставленной целью решали следующие задачи: 1) разработка и апробация методики инвентаризации КДО в элементах ландшафтной мозаики с выраженными естественными нарушениями, 2) разработка и апробация методики расчета пулов и потоков углерода КДО, 3) предварительная оценка variability пулов углерода КДО и потоков углерода в связи с их формированием и разложением.

Было обследовано 34 элемента ландшафтной мозаики в связи с нарушениями (Рис. 1). При площади элемента менее 0.1 га закладывали пробную площадь со сплошным пересчетом оставшегося материнского древостоя и учетом всех КДО по породам и классам разложения с измерением диаметров основания и вершины у валежа, зависших стволов, крупных ветвей, фрагментов и пней; диаметра на высоте 1.3 м у сухостоя и длины (высоты). При площади элемента более 0.1 га закладывали одну линейную трансекту или две трансекты шириной 4 м перпендикулярно друг другу с пересечением в центре окна. На линии учитывали валеж, зависшие деревья и ветви с измерением диаметров в месте пересечения линии и на высоте 1.3 м, на полосе – сухостой и пни с измерением диаметров и высот. Везде, где возможно, отмечали происхождение КДО (ветровал, бурелом, усыхание) и давность нарушения.



А)



Б)



В)

Рисунок 1. Примеры элементов мозаики, связанной с естественными нарушениями – ветровалами и пятнами усыхания древостоя: а) по космическим снимкам высокого пространственного разрешения (JL-1KF01C) 2022 г.; б) фото элементов с усыханием групп деревьев; в) ветровалом 10-летней давности. Фото: А.А. Корепин.

Объем валежа, зависших деревьев и крупных ветвей рассчитывали отдельно по породам, классам разложения и положению по формуле (Stahl et al., 2001):

$$V = (\pi^2/8 \sum di^2 S)/\sum Lj, \quad (1)$$

где:  $V$  – объем крупных древесных остатков данного класса разложения,  $di$  – диаметр  $i$ -го объекта в месте пересечения ходовой линии,  $Lj$  – длина  $j$ -ой ходовой линии,  $S$  – площадь, в данном случае равная 1 га.

Объем пней по породам и классам разложения ( $V_{St}$ ) рассчитывали по формуле усеченного конуса. Объем сухостойных деревьев по породам рассчитывали умножением площади поперечного сечения сухостойного дерева на высоте 1.3 м на видовую высоту.

Для определения массы углерода древесины объем по породам умножали на базисную плотность по классам разложения (Шорохова, Шорохов, 1999; Тетюхин и др., 2004). Массу углерода других фракций (корней, ветвей, коры) вычисляли с помощью конверсионных коэффициентов (Замолотчиков и др., 1998), среднего времени для каждого класса разложения и моделей разложения древесины и коры с учетом фрагментации (Shorohova, Kapitsa, 2014 a, b, 2016).

Для оценки потока углерода, связанного с разложением КДО, использовали данные о распределении КДО по породам, классам разложения и категориям (сухостой, валеж, зависшие деревья, пни), конверсионные коэффициенты отношения фитомассы корней и ветвей к объему стволовой части (Замолотчиков и др., 1998) и модели разложения крупных древесных остатков по фракциям (Shorohova, Kapitsa, 2016). Принимали процент прикрепленных ветвей для 1-го класса разложения равным 100%, для 2-го и 3-го – 50%, для 4-го и 5-го – 0%. Поток углерода рассчитывали, как разность процента потери массы данной фракции данного класса разложения данной породы, умноженного на запас углерода, за 1 год, прошедший со среднего времени для данного класса разложения.

$$\begin{aligned} \text{Поток} &= \sum_{i=1}^5 \text{класс разложения}_i \\ \text{Поток}_{\text{класс разложения}_i} &= \sum_{j=1}^n \text{поток}_{\text{порода } j} \\ \text{Поток}_{\text{класс разложения}_i \text{ породы } j} &= \sum_{k=1}^4 \text{поток}_{\text{фракция } k} \\ \text{Поток}_{\text{класс разложения}_i \text{ породы } j \text{ фракция } k} &= \text{Масса}_{\text{класс разложения}_i \text{ породы } j \text{ фракция } k} * \text{Потеря массы}/100 \end{aligned}$$

$$\text{Потеря массы} = \text{Exp}^{-k_{\text{класс разложения}_i \text{ породы } j \text{ фракция } k} * (\text{Время} + 1)} - \text{Exp}^{-k_{\text{класс разложения}_i \text{ породы } j \text{ фракция } k} * (\text{Время})} \quad (2)$$

где: «Поток» - поток углерода при разложении КДО, тСга<sup>-1</sup>год<sup>-1</sup>,  $i$  – число классов разложения (5),  $j$  – число древесных пород КДО (варьирует в зависимости от породного состава КДО на ПП),  $k$  – число фракций КДО (4): ствол, ветви, корни, кора; «Масса» - масса углерода в КДО  $i$ -го класса разложения  $j$ -ой породы  $k$ -ой фракции, тС га<sup>-1</sup>; «Потеря массы» - процент потери массы в год при разложении КДО  $i$ -го класса разложения  $j$ -ой породы  $k$ -ой фракции согласно разработанным моделям (Kapitsa, Shorohova, 2014a).

Запас углерода КДО в биогеоценозах лесов со следами естественных нарушений варьировал от 25 до 152 тС га<sup>-1</sup>, составив в среднем 63 тС га<sup>-1</sup>. Средняя величина запаса углерода КДО уменьшалась по мере увеличения давности нарушений, составив 94, 73 и 56 тС га<sup>-1</sup> для участков с давностью нарушений 1-5, 6-10 и 11-40 лет, соответственно. Самые высокие значения запаса углерода КДО отмечены после куртинного усыхания древостоя – в среднем 103 тС га<sup>-1</sup>.

Значения потока углерода в связи с разложением КДО варьировали от 0.146 до 1.538 тС га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> со средней величиной 0.679 тС га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. Средняя величина потока углерода в связи с разложением КДО, наоборот, увеличивалась по мере увеличения давности нарушений, составив 0.345, 0.702 и 0.722 тС га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> для участков с давностью нарушений 1-5, 6-10 и 11-40 лет, соответственно. Самые высокие средние значения – 0.709 тС га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup> – отмечены после ветровала и бурелома.

Задачи дальнейших исследований включают количественную оценку факторов, определяющих пулы и потоки углерода в нарушенных коренных лесах, а также оценку пулов углерода фитомассы и почвы.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

1. Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И., Коровин Г.А. Определение запасов углерода по зависимым от возраста насаждений конверсионно-объемным коэффициентам // Лесоведение. 1998. №3. С. 84-93.

2. Тетюхин С.В., Минаев В.Н., Богомолова Л.П. Лесная таксация и лесоустройство. нормативно-справочные материалы по Северо-Западу РФ // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2004. С. 369.

3. Шорохова Е.В. Запасы и экосистемные функции крупных древесных остатков в таежных лесах: дис. ... доктора биологических наук: 03.02.08 // СПб. 2020. 299 с.

4. Шорохова Е.В., Шорохов А.А. Характеристика классов разложения древесного детрита ели, березы и осины в ельниках подзоны средней тайги // Труды СПбНИИ лесн. хоз-ва. 1999. Вып. 1(2). С. 17–23.

5. Shorohova E., Kapitsa E. Mineralization and fragmentation rates of bark attached to logs in a northern boreal forest // For. Ecol. and Man. 2014. Vol. 315. Pp. 185-190.

6. Shorohova E., Kapitsa E. The decomposition rate of non-stem components of coarse woody debris (CWD) in European boreal forests mainly depends on site moisture and tree species // European Journal of Forest Research. 2016. 135: 593-606.

7. Shorohova E., Kapitsa E. Influence of the substrate and ecosystem attributes on the decomposition rates of coarse woody debris in European boreal forests // For. Ecol. and Man. 2014. Vol. 315. Pp. 173-184.

8. Shvidenko A., Mukhortova L., Kapitsa E., Kraxner F., See L., Pyzhev A., Gordeev R., Fedorov S., Korotkov V., Bartalev S., Schepaschenko D. A Modelling System for dead wood assessment in the forests of Northern Eurasia // Forests. 2023. 14(1): 45. <https://doi.org/10.3390/f14010045>.

9. Ståhl G., Ringvall A., Fridman J. Assessment of coarse woody debris – a methodological overview // Ecological bulletins. 2001. Vol. 49. Pp. 57–70.



## ЭМИССИЯ CO<sub>2</sub> ИЗ ПОЧВ РАЗЛИЧНЫХ ЭКОСИСТЕМ ЮЖНОГО ПОДМОСКОВЬЯ: ЧЕТВЕРТЬ ВЕКА НЕПРЕРЫВНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Сапронов Д.В., Мякина Т.Н., Хорошаев Д.А.,  
Митрохина Е.С.

Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Московская область, г. Пушкино, ikurg@mail.ru

Эмиссия CO<sub>2</sub> из почвы в атмосферу (ЭMCO<sub>2</sub>) является одним из главных потоков в глобальном цикле углерода [1]. Наряду с Австралией, Африкой и юго-восточной Азией, наименее изученными регионами в отношении почвенного дыхания (или эмиссии CO<sub>2</sub> из почв) являются Восточная Европа и Северная Азия [4], на территории которых расположена Российская Федерация (РФ). Занимая чуть менее 1/8 части суши, наземные экосистемы РФ играют существенную роль не только в формировании глобальных потоков и пулов углерода (C) [2], но и вносят существенный вклад в формирование неопределенностей оценок основных составляющих глобального баланса углерода в силу отсутствия сети стационарных наблюдений. Поэтому получение экспериментальных данных по определению ЭMCO<sub>2</sub> из почв в различных биоклиматических регионах РФ, является сегодня весьма актуальным и востребованным в мировом сообществе. Из-за трудоемкости процесса экспериментального определения ЭMCO<sub>2</sub> из почв в естественных экосистемах, которые обычно достаточно удалены от лабораторий и институтов, оценка почвенных потоков CO<sub>2</sub> базируется, как правило, на наблюдениях, проведенных в течение лишь нескольких вегетационных периодов и с периодичностью, редко превышающей 1–2 измерения в месяц. Многолетние наблюдения за дыханием почв, непрерывно проводимые в одних и тех же экосистемах более 3–5 лет, до настоящего времени являются довольно редкими не только в России, но и в мире. Цель представляемого исследования состояла в анализе данных по определению ЭMCO<sub>2</sub> из супесчаного дерново-подбуря под смешанным лесом и луговой растительностью на территории Приокско-Террасного биосферного заповедника (ПТЗ) и серой почвы под листовенным вторичным лесом на территории Опытной-полевой станции (ОПС) ИФХиБПП РАН, которые были начаты в ноябре 1997 г. и продолжаются по сей день. Этот поистине уникальный ряд данных включает 25 лет непрерывных круглогодичных наблюдений в двух лесных и одной луговой экосистемах, которые являются репрезентативными для зоны смешанных и широколиственных лесов Европейской части России.

Климат региона умеренно-континентальный со среднегодовой температурой воздуха 5.7°C и среднегодовым количеством осадков 640 мм (за период 1991–2020 гг.). Смешанный лес на территории ПТЗ имеет возраст 110–120 лет и сформирован сосной, липой и осиной и единично встречается дуб. Лесной БГЦ, расположенный на территории, прилегающей к ОПС ИФХиБПП РАН, представляет собой вторичный листовенный лес, основными лесобразующими породами которого являются осина, липа и клен, единично встречается береза и дуб со средним возрастом деревьев 65–70 лет. Луговой БГЦ на территории ПТЗ представлен злаково-разнотравной растительностью, которая ежегодно в середине лета скашивается.

Определение эмиссии CO<sub>2</sub> из почв (ЭMCO<sub>2</sub>) проводили круглогодично и непрерывно в течение 25 лет (1998–2022 гг.) с периодичностью 3–5 раз в месяц методом закрытых камер. Размер камер-изоляторов и время экспозиции в *теплый* (май–октябрь) и *холодный* (ноябрь–апрель) периоды различались [3]. В лесу измерительные камеры устанавливали на поверхность почвы между растениями (без удаления подстилки). В луговом ценозе наземная растительность перед установкой измерительных камер срезалась.



Таким образом, определяемый поток  $\text{CO}_2$  из почв представлял собой сумму микробной и корневой составляющих.

На каждом из трех БГЦ за все время исследований было выполнено от 1000 до 1200 измерений  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}$  из почв. Величину среднемесячной  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}$  ( $\text{мг С/м}^2/\text{час}$ ) вычисляли как среднее арифметическое из всех измерений, проведенных за соответствующий месяц. Суммарные месячные потоки  $\text{CO}_2$  почв ( $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-мес}$ ,  $\text{г С/м}^2/\text{мес}$ ) рассчитывали с учетом продолжительности соответствующего месяца. Сезонные ( $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-сез}$ ,  $\text{г С/м}^2/\text{сезон}$ ) и годовые ( $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-год}$ ,  $\text{г С/м}^2/\text{год}$ ) потоки  $\text{CO}_2$  из почв были получены суммированием соответствующих месячных потоков.

Для поиска связи величины годовой  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}$  из почв в изучаемых БГЦ на основе многолетних метеоданных (среднесуточная температура воздуха ( $T_{\text{возд}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), суточное количество осадков ( $P$ , мм)), полученных на Станции фонового мониторинга, (Сеть наблюдений Росгидромета) и расположенной на территории лугового БГЦ, были оценены следующие метеорологические индексы (МИ): (1) среднегодовая  $T_{\text{возд}}$  (МАТ,  $^{\circ}\text{C}$ ) и годовая сумма осадков (АР, мм); (2)  $ST_{5-8}$  и  $ST_{5-9}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) – сумма среднемесячных значений  $T_{\text{возд}}$  с мая по август и с мая по сентябрь, соответственно; (3)  $SP_{5-8}$  и  $SP_{5-9}$  – сумма месячных сумм осадков с мая по август и с мая по сентябрь, соответственно; (4) индексы влажности  $WI_{5-8}$  и  $WI_{5-9}$ , которые представляют собой  $\lg(SP_{5-8}/ST_{5-8})$  и  $\lg(SP_{5-9}/ST_{5-9})$  соответственно (5) гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК<sub>6-8</sub>) за летний период (июнь–август) – отношение суммы осадков (мм) за период со среднесуточной температурой воздуха выше  $10^{\circ}\text{C}$  к сумме температур за этот же период, деленное на 10.

Внутригодовая динамика среднемноголетней величины  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-мес}$  в изучаемых почвах имела «классический» для умеренной зоны характер (рис. 1): с минимальными величинами (20–25  $\text{г С/м}^2/\text{мес}$ ) – в зимние месяцы и с максимальными (76–127  $\text{г С/м}^2/\text{мес}$ ) – в летние. Вместе с тем, аномально высокие значения  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-мес}$  в зимние месяцы (42–60  $\text{г С/м}^2/\text{мес}$ ), обусловленные отсутствием промерзания почвы при значительных положительных аномалиях зимних температур воздуха, в некоторые годы были на уровне или даже превышали минимальные величины  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-мес}$  в летние месяцы (29–57  $\text{г С/м}^2/\text{мес}$ ), которые были зарегистрированы в экстремально засушливые периоды 2002 и 2007 гг.

Сравнение величин суммарной  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-мес}$  в почвах изучаемых БГЦ показало отсутствие значимых различий между ними в период с августа по октябрь и с января по апрель (рис. 1). С мая по июль месячные потоки  $\text{CO}_2$  из почв под луговой растительностью достоверно ( $P < 0.01$ ) превышали таковые в почвах обоих лесных ценозов. В этот период имело место активное отрастание и интенсивное дыхание корней травяной растительности и возрастал вклад корневых систем в общий поток  $\text{CO}_2$  из почвы. Вследствие этого, дыхание почв под лугом в мае–июне было в среднем 1.5 раза выше, чем из почв под лесной растительностью. В ноябре и декабре величина  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-мес}$  в серой почве под лесом была достоверно выше, чем в дерново-подбуре лесного и лугового ценозов, что может быть обусловлено интенсивным разложением свежего листового опада и его активной деструкцией в позднеосенний период.

Среднемноголетние величины суммарных сезонных величин  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-сез}$  из почв исследуемых БГЦ возрастали в следующем порядке: зимние (62–79  $\text{г С/м}^2$ ) < весенние (116–153  $\text{г С/м}^2$ ) < осенние (142–153  $\text{г С/м}^2$ ) < летние (250–341  $\text{г С/м}^2$ ). В весенний и летний сезоны величины  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-сез}$  из почвы лугового ценоза были достоверно выше, чем в почвах под лесом ( $P < 0.05$ ). В осенний и зимний календарные сезоны величины  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-сез}$  из почв всех трех БГЦ значимо не отличались. Среднемноголетние потоки  $\text{CO}_2$  из лесных почв в течение теплого периода (май–октябрь) были достоверно ниже, чем величина  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-сез}$  из почвы под луговой растительностью, в то время как в холодный период года величины  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}\text{-сез}$  из почв всех трех БГЦ значимо не отличались.

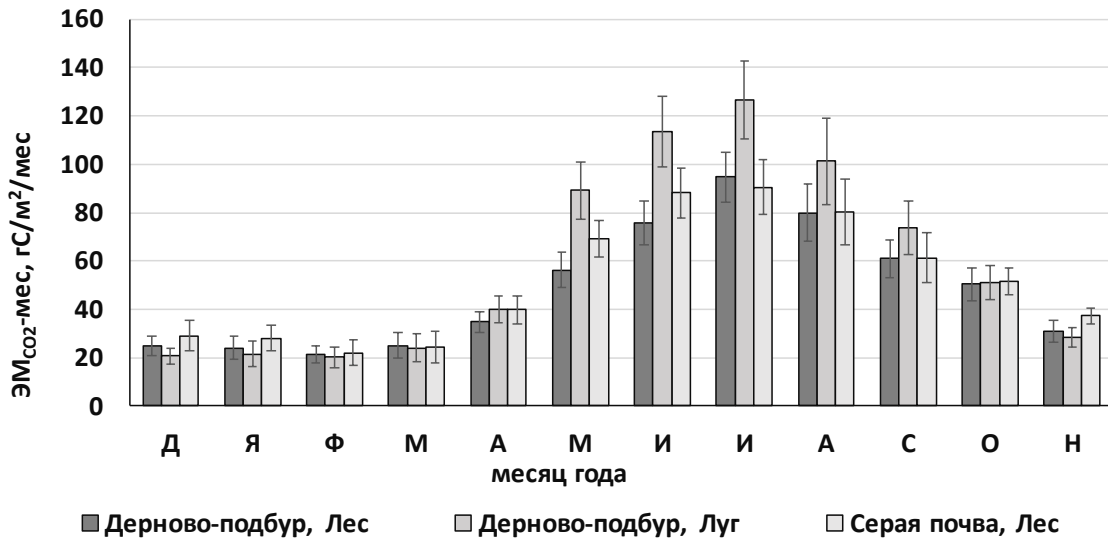


Рисунок 1. Среднемесячные величины  $ЭМ_{CO_2}$  ( $г\ C/m^2/мес$ ) из дерново-подбюра под лесной и луговой растительностью и серой почвой под лесной растительностью. Показаны средние арифметические значения и доверительные интервалы ( $p = 0.05$ ).

Наши расчеты показали, что в период с 1998 по 2014 г. суммарная годовая эмиссия  $CO_2$  из почв лесных ценозов демонстрировала очень близкие значения, свидетельствуя о том, что тип почвы не оказывал значимого влияния на годовую  $ЭМ_{CO_2}$  из почв в этот период (рис. 2). Начиная с 2014 г., годовые потоки  $CO_2$  из серой суглинистой почвы стали существенно выше таковых из супесчаного дерново-подбюра, что мы связываем с усилением аридизации климата в регионе, которое приводит к уменьшению эмиссионных потерь  $CO_2$  из супесчаных почв, практически не отражаясь на потоках  $CO_2$  из суглинистых почв. Вместе с тем на протяжении всего периода наблюдений (за исключением засушливого 2007 г.) годовая эмиссия  $CO_2$  из дерново-подбюра под луговой растительностью была существенно выше, чем из лесной почвы.

Средние многолетние величины годовой  $ЭМ_{CO_2}$  из почв лесных ценозов составили  $579 \pm 46$  и  $621 \pm 56$   $г\ C/m^2/год$  для дерново-подбюра и серой почвы, соответственно, и достоверно между собой не различались. Среднемноголетняя эмиссия  $CO_2$  из дерново-подбюра почвы под луговой растительностью была значимо выше и составляла  $710 \pm 64$   $г\ C/m^2/год$ .

Корреляционный анализ, проведенный с целью поиска связи между годовыми величинами  $ЭМ_{CO_2}$  из почв и метеорологическими индексами, выявил значимое негативное влияние температурных индексов ( $МАТ$ ,  $ST_{5-8}$ ,  $ST_{5-9}$ ) на годовую  $ЭМ_{CO_2}$  из почв с коэффициентами корреляции  $r = -0.41 \div -0.62$ . Связь величины годовых потоков  $CO_2$  из почв и  $МИ$ , основанными на количестве осадков за разные временные периоды, была положительной и более выраженной для БГЦ, сформированных на супесчаном дерново-подбюре по сравнению с лесным БГЦ на серой суглинистой почве. Наиболее тесная положительная связь наблюдалась между годовыми значениями  $ЭМ_{CO_2}$  из почв всех изучаемых БГЦ и индексами увлажнения ( $WI_{5-8}$ ,  $WI_{5-9}$ ,  $НТС_{6-8}$ )  $r = 0.43 \div 0.70$ . Все обнаруженные положительные связи были более выражены для БГЦ, сформированных на супесчаном дерново-подбюре по сравнению с лесным БГЦ на серой суглинистой почве. Для почвы под лугом корреляции  $ЭМ_{CO_2}$ -год с  $МИ$ , основанными на количестве осадков за разные временные периоды, были более тесными по сравнению с почвой под лесными БГЦ.

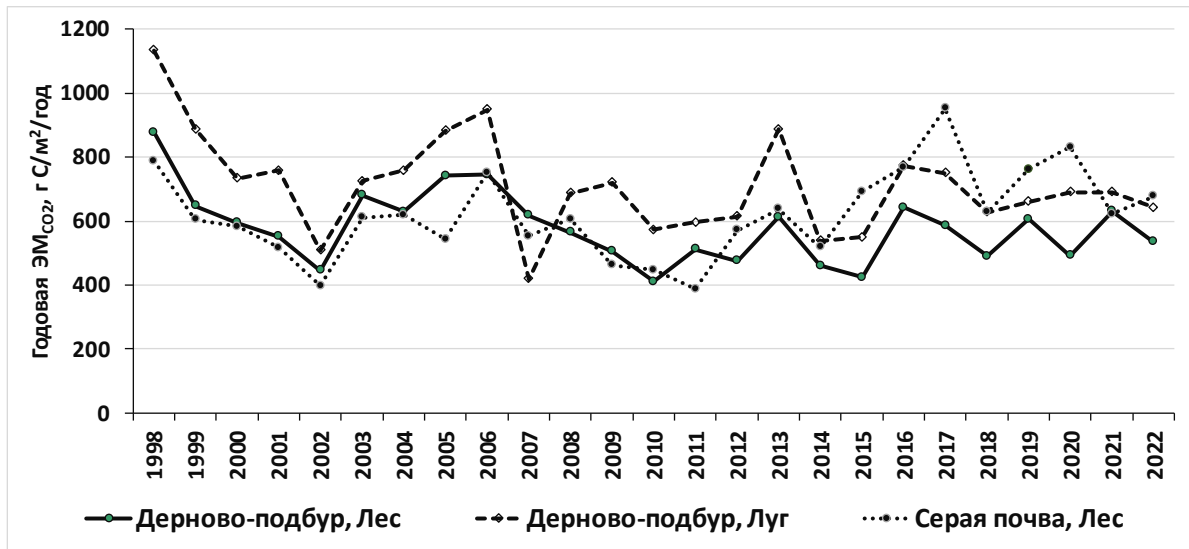


Рисунок 2. Динамика годовых потоков  $\text{CO}_2$  из почв лесных и лугового БГЦ, сформированных на дерново-подбурях и серой почве.

Таким образом, в пределах одной биоклиматической зоны тип ценоза (лесной vs луговой) оказывает значимое влияние на годовые потоки  $\text{CO}_2$  из почв, в то время как влияние типа почв на величину суммарной годовой эмиссии  $\text{CO}_2$  из почв лесных ценозов было менее существенным и не отразилось на величине средних годовых потоков  $\text{CO}_2$  из почв лесных ценозов, которые составили  $579 \pm 46$  и  $621 \pm 56$  г  $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$  для дерново-подзолистой и серой лесной почв, соответственно. Почва под луговой растительностью в среднем за год выделяла в атмосферу  $710 \pm 64$  г  $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ . Выявлены значимые положительные корреляционные связи между величинами годовой  $\text{ЭМ}_{\text{CO}_2}$  из почв всех изучаемых БГЦ с индексами влажности и метеорологическими индексами, основанными на количестве осадков за разные временные периоды вегетационного сезона, свидетельствуя о главенствующей роли увлажнения в формировании годовых потоков  $\text{CO}_2$  из почв в регионе южного Подмосковья.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

1. Заварзин Г.А., Кудеяров В.Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник РАН. 2006. Т. 76. № 1. С. 14–29.

2. Kurganova I., Kudeyarov V. Ecosystems of Russia and Global Carbon Budget. Science in Russia. 2012. Vol. 5. P. 25–32.

3. Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Rozanova L.N., Kudeyarov V.N. Annual emission of carbon dioxide from soils of the Southern Taiga soils of Russia // Eurasian Soil Science. – 2001. V. 34. P. 931–944.

4. Xu M., Shang H. Contribution of soil respiration to the global carbon equation // Journal Plant Physiology. 2016. V. 203. – P.16–28.

## ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДЫХАНИЯ ПОЧВ ЛЕСНЫХ И ЛУГОВЫХ ЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО- КОНТИНЕНТАЛЬНОГО КЛИМАТА

*Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Хорошаев Д.А., Сапронов Д.В., Мякина Т.Н.*  
Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Московская область, Пущино, vlopes@mail.ru

Дыхание почв (soil respiration, SR) это процесс с выделения  $\text{CO}_2$  из почвы в атмосферу в результате двух основных процессов: разложения подстилки и органического вещества почвы за счет деятельности микро- и макроорганизмов (микробное дыхание) и корневого (или автотрофного) дыхания [6]. Наиболее важными абиотическими факторами, влияющими на величину SR, являются температура и влажность почвы, тогда как качество и доступность органических субстратов являются основными биотическими факторами, которые определяются типом растительности и ее продуктивностью [1]. Зависимость величины SR от температуры воздуха или почвы, как правило, носит линейный или экспоненциальный характер. Для количественной характеристики связи между этими параметрами используют коэффициент температурной чувствительности  $Q_{10}$ , представляющий собой величину, на которую умножается скорость SR при повышении температуры на  $10^\circ\text{C}$  [2]. Коэффициент  $Q_{10}$  применяют во многих моделях углеродного цикла, используя его фиксированное значение, равное 1.5 или 2.0 для всех типов почв [4]. Вместе с тем, когда пространственно разные значения  $Q_{10}$  были интегрированы в модели вместо фиксированного значения  $Q_{10}$ , то полученные оценки величин SR были на 40% выше. Поэтому даже небольшие неточности в значениях коэффициента  $Q_{10}$  могут привести к существенным погрешностям глобальных оценок почвенного дыхания и баланса C [7]. Таким образом, необходимы исследования, направленные на более глубокое понимание процессов и факторов, влияющих на температурную чувствительность SR. Цель представляемого исследования состояла в оценке сезонной и межгодовой динамики температурной чувствительности SR на основе уникальных непрерывных 25-летних натурных измерений дыхания почвы в двух лесных и двух луговых ценозах южного Подмосковья, сформированных на почвах разного типа и контрастного гранулометрического состава.

Исследования проводили на территории Приокско-Террасного биосферного заповедника (ПТЗ, 54.902 N, 37.555 E, лесной и луговой ценозы) на супесчаном дерново-подбуре и вблизи г. Пущино на бывшей Опытной-полевой станции Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ОПС ИФХиБПП РАН, 54.834 N, 37.575 E, лесной и луговой ценозы) на серой суглинистой почве. Регион исследований относится к зоне умеренно-континентального климата со среднегодовой температурой воздуха  $5.7^\circ\text{C}$  и среднегодовым количеством осадков 640 мм (1991–2020 гг.). Почвы экспериментальных площадок имеют разную типовую принадлежность (дерново-подбурья vs серые), контрастный гранулометрический состав (супесчаная vs суглинистая) и проявляют существенные различия по другим свойствам (pH, содержание  $\text{C}_{\text{орг}}$ ,  $\text{N}_{\text{общ}}$ ,  $\text{C}_{\text{мик}}$ ). Общее дыхание почвы, включающее корневую и микробную компоненты, определяли круглогодично (3–5 раз в месяц) с использованием камерного статического метода [3]. Параллельно контролировали температуру и влажность почвы в слое 0–5 см. В работе обобщены данные измерений дыхания почв за 1998–2022 гг. (25 лет), в течение которых наблюдались самые разные сочетания погодных условий. Для их характеристики на основе рядов метеоданных, представленных среднемесячными температурами воздуха ( $T_{\text{в}}$ ,  $^\circ\text{C}$ ) и месячными суммами осадков ( $P$ , мм), наряду со среднегодовыми значениями  $T_{\text{в}}$  ( $\text{MAT}$ ,  $^\circ\text{C}$ ), годовыми суммами осадков  $P$  ( $\text{SP}$ , мм), суммами среднемесячных температур

(°C) с мая по август  $ST_{5-8}$  и с мая по сентябрь ( $ST_{5-9}$ ), суммами осадков за периоды май–август ( $SP_{5-8}$ ) и май–сентябрь ( $SP_{5-9}$ ), были рассчитаны индексы влажности ( $WI_{5-8}$ ,  $WI_{5-9}$ ) и гидротермический коэффициент Селянинова за летний период ( $HTC_{6-8}$ ).

Оценка температурного отклика величины SR в исследуемых лесных экосистемах проводилась для всего 25-летнего ряда экспериментальных данных, для совокупностей данных за сухие, влажные и нормальные по условиям увлажнения годы и дифференцированно для каждого года в отдельности. Температурный коэффициент  $Q_{10}$ , рассчитывали на основе линейной регрессионной зависимости между натуральным логарифмом SR и температурой верхнего 5-см слоя почвы,  $T_p$  [5]:

$$SR = k \cdot T_p + b \quad (1)$$

$$Q_{10} = \exp(10 \cdot k) \quad (2).$$

Температурную чувствительность SR вычисляли для всего ряда данных ( $Q^*_{10}$ ) и для выборки значений SR, измеренных в интервале  $T_p$  выше 1°C ( $Q_{10}$ ), с тем, чтобы избежать влияния процессов замораживания оттаивания на величину температурного коэффициента. Для поиска связей между величиной  $Q_{10}$  с метеорологическими индексами за время всего периода наблюдений использовали корреляционный и регрессионный анализы.

Вычисления температурных коэффициентов, выполненные на основе всего массива экспериментальных данных (табл.1), показали, что величины  $Q^*_{10}$  оцененные для всего диапазона  $T_p$ , всегда превышали  $Q_{10}$  для  $T_p > 1^\circ\text{C}$ . Величины  $Q^*_{10}$  и  $Q_{10}$  для супесчаного дерново-подбуря под лесной растительностью были выше, чем в лесной экосистеме на серой суглинистой почве: 2.47 vs 2.26 и 2.11 vs 1.79 (табл.1), что может быть обусловлено наличием более мощной подстилки на дерново-подбуре по сравнению с серой почвой, имеющей фрагментарную подстилку в течение всего лета. Для луговых ценозов закономерность была обратной, что мы объясняем более выраженным влиянием дефицита увлажнения на величину SR в супесчаном дерново-подбуре, что снижало как сами значения SR, так и его температурную чувствительность.

**Таблица 1. Оценка температурной чувствительности SR в лесных и луговых ценозах на основе всей совокупности экспериментальных данных за 1998–2022 гг.**

Почва	Дерново-подбур				Серая почва			
	Лесной		Луговой		Лесной		Луговой	
Показатель	$Q^*_{10}$	$Q_{10}$	$Q^*_{10}$	$Q_{10}$	$Q^*_{10}$	$Q_{10}$	$Q^*_{10}$	$Q_{10}$
Значение	2.47	2.11	2.59	2.19	2.26	1.79	3.47	2.37
$R^2$	0.55	0.44	0.55	0.41	0.51	0.37	0.57	0.46
n	1070	729	1119	767	981	671	1018	700

Примечание.  $Q^*_{10}$  и  $Q_{10}$  температурные коэффициенты, оцененные для всего диапазона  $T_p$  и для  $T_p > 1^\circ\text{C}$ , соответственно;  $R^2$  - коэффициент детерминации; n – число наблюдений; Все коэффициенты значимы при  $p << 0.0001$ .

Величины температурных коэффициентов для SR, оцененные для каждого года отдельно отличались высокой вариабельностью, изменяясь от 1.40 до 6.29 ( $Q^*_{10}$ ) и от 1.33 до 5.24 ( $Q_{10}$ ). Межгодовая изменчивость температурных коэффициентов  $Q^*_{10}$  и  $Q_{10}$  в зависимости от типа почвы и ценоза составляла 18-41%, а коэффициенты осцилляции достигали 1.57–2.03 (табл. 2).

**Таблица 2. Статистические характеристики температурной чувствительности SR в лесных и луговых ценозах за 1998–2022 гг. (n=25).**

Почва	Дерново-подбур				Серая почва			
	Лесной		Луговой		Лесной		Луговой	
Ценоз	Q* <sub>10</sub>	Q <sub>10</sub>	Q* <sub>10</sub>	Q <sub>10</sub>	Q* <sub>10</sub>	Q <sub>10</sub>	Q* <sub>10</sub>	Q <sub>10</sub>
Показатель	Q* <sub>10</sub>	Q <sub>10</sub>	Q* <sub>10</sub>	Q <sub>10</sub>	Q* <sub>10</sub>	Q <sub>10</sub>	Q* <sub>10</sub>	Q <sub>10</sub>
Mean	2.65	2.20	2.82	2.46	2.37	1.91	3.56	2.41
Median	2.56	2.25	2.41	2.12	2.19	1.90	3.44	2.33
Min	1.58	1.42	1.40	1.38	1.48	1.33	2.27	1.63
Max	5.04	3.15	5.42	5.24	6.29	2.74	5.71	3.62
Range (Max – Min)	3.46	1.73	4.02	3.86	4.81	1.40	3.44	1.99
SE	0.18	0.10	0.20	0.20	0.20	0.07	0.21	0.11
CI	0.37	0.21	0.42	0.42	0.41	0.14	0.42	0.22
CV, %	33.0	22.8	36.3	41.1	40.7	17.8	28.8	22.5
Cos (Range/Mean)	1.31	0.78	1.43	1.57	2.03	0.73	0.97	0.82

Примечание: Mean, Median, Min, Max – среднее, медиана, максимальное и минимальное значения, соответственно. Range – разница между Max and Min; SE – стандартная ошибка; CI – доверительный интервал, CV – коэффициент вариации; Cos – коэффициент осцилляции.

Уровень засушливости/увлажненности года исследований оказывал существенное влияние на температурную чувствительность SR во всех изученных ценозах (табл. 3). Так, значения Q<sub>10</sub> для величины SR в изученных почвах в засушливые годы были в 1.2–1.4 раза ниже, чем в годы с нормальным уровнем влажности.

**Таблица 3. Температурная чувствительность SR в лесных и луговых ценозах в разные по увлажнению годы.**

Уровень увлажнения	Лесной ценоз				Луговой ценоз			
	Q* <sub>10</sub>	R <sup>2</sup>	Q <sub>10</sub>	R <sup>2</sup>	Q* <sub>10</sub>	R <sup>2</sup>	Q <sub>10</sub>	R <sup>2</sup>
Дерново-подбур								
Нормальный	2.72	0.59	2.33	0.51	2.84	0.56	2.53	0.48
Влажный	2.42	0.61	2.32	0.52	2.94	0.63	2.72	0.54
Сухой	2.13	0.45	1.64	0.29	2.22	0.54	1.80	0.34
Серая почва								
Нормальный	2.66	0.56	2.09	0.50	3.69	0.59	2.57	0.52
Влажный	2.17	0.54	1.80	0.42	3.74	0.58	2.49	0.50
Сухой	1.89	0.47	1.49	0.28	3.13	0.56	2.20	0.50

Примечание. Q\*<sub>10</sub> и Q<sub>10</sub> температурные коэффициенты для всего диапазона T<sub>п</sub> и для T<sub>п</sub> > 1°C, соответственно; R<sup>2</sup> - коэффициент детерминации; Все коэффициенты значимы при p << 0.0001.

Считается, что снижение влажности почвы может блокировать влияние температуры на величину SR, делая его нечувствительным к изменениям температуры. Температурная чувствительность SR зависит от наличия влаги, поскольку она влияет на коэффициент диффузии растворимых органических субстратов, который будет низким при недостатке влаги [7]. Низкая диффузионная способность растворимых субстратов при дефиците влаги и недостаток кислорода при высоком содержании воды снижают дыхание почвенной микробиоты, уменьшая ее температурную чувствительность.

Для обоих типов почвы и во всех изученных ценозах мы наблюдали значительную положительную корреляцию значений  $Q_{10}$  с количеством осадков и индексами влажности  $WI_{5-8}$  и  $WI_{5-9}$  в разные периоды вегетационного сезона. Наши результаты наглядно показали, что влагообеспеченность, которая определялась условиями засушливости в течение вегетационного периода, была ключевым фактором межгодовой изменчивости значений  $Q_{10}$  в лесных и луговых экосистемах южного Подмоскovie, а гранулометрический состав почвы влиял на тесноту связи между температурной чувствительностью SR и метеоиндексами.

Таким образом, мы заключаем, что сумма осадков за период май – август и индексы влажности, рассчитанные на ее основе, являются теми параметрами, которые определяют величину температурной чувствительности дыхания почвы в лесных и луговых экосистемах южного Подмоскovie. Учитывая отчетливую тенденцию к аридизации климата в изучаемом регионе, можно прогнозировать снижение температурной чувствительности почвенного дыхания и предположить увеличение стока углерода в лесные экосистемы бореального и умеренного поясов в условиях текущих климатических трендов. В будущем для повышения точности оценок годового потока SR и моделирования баланса углерода в лесных экосистемах перспективным является дифференцированное использование значений  $Q_{10}$  для оценки интенсивности SR в различные по метеоусловиям периоды исследований.

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 22-24-00691).

1. Davidson E. A., Janssens I. A., Luo Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond  $Q_{10}$  // *Global Change Biology*. 2006. 2 (12). С. 154–164.
2. Kirschbaum M. U. F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage // *Soil Biol. Biochem.* 1995. 6 (27). P. 753–760.
3. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Khoroshaev D.A., Myakshina T.N., Sapronov D.V., Zhmurin V.A., Kudeyarov V.N. Analysis of the Long-Term Soil Respiration Dynamics in the Forest and Meadow Cenoses of the Prioksko-Terrasny Biosphere Reserve in the Perspective of Current Climate Trends // *Eurasian Soil Sci.* 2020. Vol. 3, N 10. P. 1421–1436.
4. Meyer N., Welp G., Amelung W. The Temperature Sensitivity ( $Q_{10}$ ) of Soil Respiration: Controlling Factors and Spatial Prediction at Regional Scale Based on Environmental Soil Classes // *Global Biogeochemical Cycles*. 2018. 2 (32). P. 306–323.
5. Pavelka M., Acosta M., Marek M.V., Kutsch W., Janous D. Dependence of the  $Q_{10}$  Values on the Depth of the Soil Temperature Measuring Point // *Plant Soil*. 2007. Vol. 292, P. 171–179.
6. Rustad L. E., Huntington T. G., Boone R. D. Controls on soil respiration: Implications for climate change // *Biogeochemistry*. 2000. 1 (48). P. 1–6.
7. Zhou T., Shi P., Hui D., Luo Y. Global pattern of temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration ( $Q_{10}$ ) and its implications for carbon-climate feedback // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2009. G2 (114).

## МЕЖГОДОВАЯ ДИНАМИКА ЭКОСИСТЕМНОГО ОБМЕНА CO<sub>2</sub> ЮЖНО-ТАЁЖНЫХ ЕЛЬНИКОВ НА ТОРФЯНЫХ И МИНЕРАЛЬНЫХ ПОЧВАХ

*Мамкин В.В.<sup>1,2</sup>, Варлагин А.В.<sup>1</sup>, Татаринов Ф.А.<sup>2,3</sup>, Трусова С.Н.<sup>1</sup>, Ясенева И.А.<sup>4</sup>,  
Курбатова Ю.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва,  
vadimmamkin@sevin.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,  
г. Москва, vmamkin@hse.ru

<sup>3</sup>Научный институт имени Вайцмана, Израиль, г. Реховот, f.tatarinov@gmail.com

<sup>4</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, iyaseneva@yandex.ru

Современные изменения климата, наряду с природными и антропогенными нарушениями, приводят к трансформации процессов поглощения и эмиссии CO<sub>2</sub> лесными экосистемами, что, в свою очередь, оказывает воздействие на углеродный баланс и чистый экосистемный обмен (NEE) лесов с атмосферой (Bonan, 2008; Lal et al., 2018). NEE определяется, в значительной мере, разностью между величиной эмиссии диоксида углерода при экосистемном дыхании (TER) и валовой первичной продукцией (GPP) - количеством углерода, поглощённым при фотосинтезе, за вычетом автотрофного дыхания (Woodwell, Whittaker, 2006; Chapin et al., 2006). Исследования последних десятилетий показали крайнюю восприимчивость NEE, TER и GPP в лесных экосистемах к аномалиям температуры воздуха и осадков (Bonan, 2008; Chapin et al., 2008). Пространственная изменчивость локальных условий окружающей среды существенно осложняет возможности экстраполяции оценок потоков, полученных для отдельного объекта, на другие лесные экосистемы, даже в пределах одного региона или типа растительного покрова. Одним из факторов пространственной неоднородности условий среды, способных оказать значительное влияние на процессы поглощения и эмиссии CO<sub>2</sub> в лесных экосистемах, является заболачивание. Процессы заболачивания охватывают около пятой части территории России, в том числе заболачиванию подвержены южно-таёжные леса запада европейской территории России (ЕТР, Вомперский и др., 2011). Таким образом, неоднородность условий гидрологического режима в пределах подзоны южно-таёжных лесов запада ЕТР, связанная с заболачиванием, может приводить к разнонаправленным реакциям процессов поглощения и эмиссии CO<sub>2</sub> в различных лесных экосистемах региона в ответ на климатические аномалии метеопараметров. Многолетний мониторинг экосистемных потоков CO<sub>2</sub> позволяет исследовать воздействие климатических аномалий на процессы поглощения и эмиссии диоксида углерода в лесных экосистемах с учётом пространственной неоднородности локальных условий гидрологического режима.

Цель настоящей работы состояла в изучении межгодовой динамики чистого экосистемного обмена CO<sub>2</sub> (NEE) и его компонентов (GPP и TER) на основе сравнительного анализа данных непрерывных экспериментальных наблюдений методом турбулентных пульсаций в двух южно-таёжных ельниках: в ельнике неморальном на минеральных почвах и в ельнике заболоченном сфагново-черничном на торфяных почвах и в определении зависимости потоков CO<sub>2</sub> от факторов внешней среды.

Экспериментальные исследования были выполнены на территории Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (ЦЛГПБЗ) в Тверской области. Растительность заповедника представлена типичными сообществами южной тайги, в основном, ельниками (Пузаченко и др., 2007). Около четверти территории ЦЛГПБЗ охвачены процессами заболачивания. Объектами исследования были ельник



неморальный кислично-щитовниковый (ЕН) на хорошо дренируемых дерново-подзолистых и дерново-палево-подзолистых почвах ( $56.4476^{\circ}$  с.ш.,  $32.9018^{\circ}$  в.д., 265 м н.у.м.) и заболоченный ельник (ЕЗ) сфагново-черничный на торфяно-подзолисто-глеевых почвах ( $56.4615^{\circ}$  с.ш.,  $32.9221^{\circ}$  в.д., 265 м н.у.м.), расстояние между которыми составляет 2 км. Возраст древостоя ельников достигает 200 лет. Пульсационные измерения проводились в ЕН на высоте 42 м с помощью газоанализатора с коротким воздухозабором LI-7200A (LI-COR Inc., США) и акустическим анемометром Gill WindMaster Pro (Gill Instruments Ltd., Великобритания), а в ЕЗ на высоте 29 м - с помощью газоанализатора LI-6262-3 (LI-COR Inc., США) и акустического анемометра Gill Solent R3 (Gill Instruments Ltd, Великобритания). Подробно объекты исследования и приборная база описаны в (Kurbatova et al., 2008; Mamkin et al., 2022; Mamkin et al., 2023). Расчёт потоков осуществлялся с помощью программного обеспечения EddyPro (LI-COR Inc., США). Данные со знаком качества 2 по системе 0-1-2 (Mauder, Foken, 2006), а также полученные во время осадков удалялись из рассмотрения. Фильтрация данных по критерию динамической скорости ( $U^*$ -filtering), заполнение пропусков в рядах NEE, а также расчёт GPP и TER на основе NEE и данных метеонаблюдений осуществлялся с помощью программного пакета в среде R REddyProc (Wutzler et al., 2018). Для анализа данных пульсационных наблюдений был выбран период с 2015 по 2020 гг.

За выбранный период наблюдались как отрицательные, так и положительные аномалии температуры воздуха и осадков. По данным метеостанции «Торопец», расположенной в 80 км к западу от объектов исследования ( $56.48^{\circ}$  с.ш.,  $31.63^{\circ}$  в.д., 187 м н.у.м.), и метеостанции «Лесной заповедник» ( $56.50^{\circ}$  с.ш.,  $32.83^{\circ}$  в.д., 240 м н.у.м.), расположенной в 2-х км к востоку от ЕЗ и ЕН в 2017 году, наблюдались аномально холодные ( $12.3^{\circ}\text{C}$ ) и влажные (осадки составили 562 мм) условия вегетационного периода (12.04-11.10), а в 2018 г. аномально тёплые ( $14.8^{\circ}\text{C}$ ) и сухие (343 мм) при норме температуры воздуха вегетационного периода  $13.6\pm 0.8^{\circ}\text{C}$  и норме осадков  $445\pm 114$  мм за 1991-2020 гг. Кроме того, на период измерений пришлась аномально тёплая зима 2019/2020 гг. (1 ноября-31 марта) с отсутствием устойчивого снежного покрова и температурой воздуха  $1.3^{\circ}\text{C}$  при многолетней норме  $-3.5\pm 1.9$ .

Исследование показало, что ЕН и ЕЗ могут являться как источником, так и стоком атмосферного  $\text{CO}_2$ , в зависимости от погодных условий конкретного года наблюдений. Так, NEE ЕН варьировал от  $-67$  до  $196$   $\text{гСм}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ , а у ЕЗ от  $-62$  до  $145$   $\text{гСм}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ . Причём аномально тёплые и сухие условия вегетационного периода 2018 г. привели к увеличению GPP двух ельников, увеличению TER у заболоченного ельника, увеличению отношения GPP/TER и снижению TER у неморального ельника на минеральных почвах. Наиболее значительное влияние аномально тёплые и сухие условия вегетационного периода 2018 г. оказали на отношение GPP/TER ЕН (1.47), по сравнению с ЕЗ (1.02). В год с аномально влажными и холодными условиями вегетационного периода отношение GPP/TER у ЕН составило 0.97 и 0.99 у ЕЗ. При этом положительная температурная аномалия зимой 2019/2020 гг. привела к раннему началу фотосинтеза у ельников.

Основным фактором различий межгодовой динамики NEE 2-х ельников является разнонаправленность ответной реакции TER на изменения условий внешней среды. Так, в ходе исследования было установлено, что положительная аномалия осадков приводит к увеличению грунтовых вод ЕЗ, что, в свою очередь, оказывает ингибирующее влияние на TER, и напротив, отрицательная аномалия осадков и связанное с ней снижение уровня грунтовых вод обеспечивают высокие величины дыхания экосистемы. У ЕН, наоборот, недостаток влагосодержания верхних горизонтов почвы может иметь отрицательное влияние на TER. Таким образом, прогнозные оценки NEE еловых лесов южной тайги должны учитывать пространственную неоднородность условий почвенного увлажнения, а долговременные прямые наблюдения за экосистемными потоками парниковых газов

являются полезным инструментом для изучения и прогноза функционирования лесов в условиях современных изменений климата.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1022031600002-1-1.6.19) при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 21-14-00209), программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ и важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6). Сравнительный анализ потоков CO<sub>2</sub> двух ельников, интерпретация полученных данных и подготовка текста работы выполнено Мамкиным В.В. и Трусовой С.Н. в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 1022031600002-1-1.6.19). Экспериментальные наблюдения, выполненные в ЕН и ЕЗ, были осуществлены Варлагиным А.В. при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 21-14-00209). Обработка данных пульсационных наблюдений в ЕЗ была выполнена Татариновым Ф.А. в рамках программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ, обработка данных пульсационных наблюдений в ЕН осуществлена Курбатовой Ю.А. при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

1. Вомперский С. Э., Сирин А. А., Сальников А. А., Цыганова О. П., Валяева Н. А. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России //Лесоведение. – 2011. – №. 5. – С. 3-11.

2. Пузаченко Ю.Г., Желтухин А.С., Козлов Д.Н., Кораблёв Н.П., Федяева М.В., Пузаченко М.Ю., Сиунова Е.В. Центрально-Лесной государственный природный биосферный заповедник: популярный очерк. М.: Изд-во Деловой мир. – 2007. – 80 С.

3. Bonan G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests //Science. – 2008. – V. 320. – №. 5882. – P. 1444-1449.

4. Chapin F. S., Woodwell G.M, Randerson J.T., Lovett G.M., Rastetter E.B., Baldocchi D.D., Clark D.A., Harmon M.E., Schimel D.S., Valentini R., Wirth C., Aber J.D., Cole J.J., Goulden M.L., Harden J.W., Heimann M., Howarth R.W., Matson P.A., McGuire A.D., Melillo J.M., Mooney H.A., Neff J.C., Houghton R.A., Pace M.L., Ryan M.G., Running S.W., Sala O.E., Schlesinger W.H., Schulze E. D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods //Ecosystems. – 2006. – V. 9. – №. 7. – P. 1041-1050.

5. Chapin F.S., Randerson J.T, McGuire A.D., Foley J.A, Field C.B. Changing feedbacks in the climate– biosphere system // Front Ecol Environ. – 2008. – V.6. – №.6. – P.313– 320.

6. Kurbatova J., Li C., Varlagin A., Xiao X., Vygodskaya N. Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia //Biogeosciences. – 2008. – V. 5. – P. 969–980.

7. Lal R., Smith P., Jungkunst H. F., Mitsch W. J., Lehmann J., Nair P. R., McBratney A.B., Carlos de Moraes Sá J., Schneider J., Zinn Y. L., Skorupa A.L.A., Zhang H.-L., Minasny B., Srinivasrao C., Ravindranath N. H. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. //J Soil Water Conserv. – 2018. – V. 73. – P. 145A-152A.

8. Mamkin V., Varlagin A., Yaseneva I., Kurbatova J. Response of Spruce Forest Ecosystem CO<sub>2</sub> Fluxes to Inter-Annual Climate Anomalies in the Southern Taiga //Forests. – 2022. – V. 13. – №. 7. – P. 1019.

9. Mamkin V., Avilov V., Ivanov D., Varlagin A., Kurbatova J Interannual variability in the ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes at a paludified spruce forest and ombrotrophic bog in the southern taiga // Atmospheric Chemistry and Physics. — 2023. — Vol. 23. — P. 2273–2291.

10. Mauder M., Foken T. Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure //Meteorologische Zeitschrift. – 2006. – V. 15. – №. 6. – P. 597- 609.

11. Woodwell G. M., Whittaker R. H. Primary production in terrestrial ecosystems //American Zoologist. – 1968. – V. 8. – №. 1. – P. 19-30.

12. Wutzler T., Lucas-Moffat A., Migliavacca M., Knauer J., Sickel K., Šigut L., Menzer O., Reichstein M. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc //Biogeosciences. – 2018. – V. 15. – №. 16. – P. 5015-5030.

## ЭМИССИОННЫЕ И ОБМЕННЫЕ ПОТОКИ CO<sub>2</sub> С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ В СОСНОВЫХ НАСАЖДЕНИЯХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ

*Махныкина А.В.<sup>1,2</sup>, Полосухина Д.А.<sup>1,2</sup>, Трусов Д.В.<sup>2,1</sup>, Прокушкин А.С.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск, [makhnykina.av@ksc.krasn.ru](mailto:makhnykina.av@ksc.krasn.ru)

<sup>2</sup>Институт экологии и географии, г. Красноярск

Современные реалии диктуют возросший интерес к изучению цикла углерода, как в целом, так и отдельных его составляющих. Особый интерес представляет секвестрационная способность лесных территорий, способных компенсировать антропогенное воздействие на окружающую природную среду (Lorenz, Lal, 2010; Pukkala, 2018). Бореальные леса Сибири, являясь основным поглотителем (Blaško et al., 2022; Pugh et al., 2019) углерода атмосферы способны улавливать и хранить до 1700 Пг углерода (Bradshaw, Warkentin, 2015).

Почвы бореальной зоны служат основным долгосрочным резервуаром углерода. Однако в последние десятилетия ввиду климатических изменений и интенсификации антропогенной нагрузки почвенный пул становится все менее стабильным. Рост температур воздуха, резкие смены условий увлажнения, сокращение межпожарных интервалов, вспышки массового размножения насекомых и ряд других факторов ведут к выделению дополнительного CO<sub>2</sub> в атмосферу (IPCC, 2021).

Подчиненный ярус леса выполняет ключевую роль в поддержании динамического равновесия в лесной экосистеме, включая биогеохимические циклы элементов, остается наименее изученным компонентом лесных биогеоценозов в вопросе связывания углерода. При этом данный компонент экосистемы формируют, как правило, сплошной живой напочвенный покров в бореальных лесах, по фитомассе сопоставимый запасам фотоассимиляционного аппарата полога древостоя (Kolari et al., 2006; Smith et al., 2017). Исследование потоков CO<sub>2</sub> в подчиненном ярусе позволит оценить способность адаптации почв и напочвенного покрова к меняющимся условиям окружающей природной среды.

Целью настоящей работы было рассмотреть эмиссионные и обменные потоки CO<sub>2</sub> с поверхности почвы в суточном и сезонном масштабе на территории сосновых насаждений Центральной Сибири.

Исследования проводились в среднетаежных экосистемах бореальной зоны на территории Туруханского района Красноярского края. Район исследования расположен в непосредственной близости от Международной обсерватории «Станция высотной мачты ZOTTO» (<http://www.zottoproject.org>). Климат района относится к резко континентальному. Колебания температур воздуха в пределах месяца может достигать порядка 40 °С. Средняя годовая температура воздуха составляет -3.4 °С, средняя сумма осадков 603 мм в год (<http://www.meteo.ru>, метеостанция Бор). Основным фактором распределения растительных сообществ в данном районе является уровень грунтовых вод, определяющий степень увлажнения местообитаний. Структура почвенного покрова изучаемой территории определяется особенностями рельефа и почвообразующих пород. На участках, где доминируют сосняки, почвенный покров представлен иллювиально-железистыми песчаными подзолами (Классификация и диагностика, 1977).

В качестве объектов исследования были выбраны сосняки лишайниковые и зеленомошные. Данные типы леса не только являются одними из доминантов растительного покрова района исследования, но также составляют основу лесосырьевой базы региона.

Основным методикой для определения потоков CO<sub>2</sub> являлся метод закрытых камер динамического типа. Измерения почвенной эмиссии и обменных потоков (NSE – net soil exchange) CO<sub>2</sub> проводились с использованием инфракрасного газоанализатора LI-A8100

(Li-cor Biogeosciences Inc., США). Для измерения эмиссионного потока использовалась камера 8100-103 Survey chamber, для измерения обменных потоков – прозрачная камера 8100-104C Clear Long-Term Chamber. Температура почвы фиксировалась на трех глубинах от поверхности почвы – 5, 10 и 15 см, используя датчик температуры почвы Soil Temperature Probe Type E (Omega, США). Влажность почв (SWC – soil water content) рассчитывалась с помощью влагомера Theta Probe Model ML2 (Delta T Devices Ltd., Великобритания) на глубине 5 см от поверхности почвы (без напочвенного покрова).

Исследования сезонной и суточной динамики потоков  $\text{CO}_2$  проводились в период с июня по сентябрь 2022 г. Время замеров сезонной эмиссии потоков варьировало в диапазоне с 11:00 до 16:00, с частотой – раз в 5-7 дней, в зависимости от погодных условий. При суточных наблюдениях за обменными потоками  $\text{CO}_2$  измерения проводились каждые 30 минут за сутки в течение измерительного сезона.

По метеорологическим условиям, сезон 2022 года характеризуется довольно средними значениями по условиям увлажнения и температуре воздуха по сравнению со средними многолетними данными с метеостанции Бор: сумма осадков с июня по сентябрь 276 мм, средняя температура воздуха за этот период 13.1 °С.

Анализ эмиссионных потоков  $\text{CO}_2$  для двух выбранных участков показал четко выявленную сезонную динамику и существенную вариацию в скорости потоков (рис. 1). Максимальные потоки характерны для середины летнего измерительного сезона. Отмечаются значительные различия в величине эмиссионных потоков между сосняком лишайниковым и зеленомошным. Почти на всем протяжении сезона скорость эмиссионного потока в сосняке зеленомошном была на 40-65% выше, чем в сосняке лишайниковом. Исключение составляет лишь период, начало сентября, когда наблюдались низкие значения влажности почв в сосняке зеленомошном.

В среднем за сезон эмиссионный поток в сосняке лишайниковом варьировал от 1.1 до 8.7 микромоля  $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . В сосняке зеленомошном изменялся от 1.7 до 17.1 микромоля  $\text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Суммарно за измерительный период с поверхности почвы выделилось: в сосняке лишайниковом –  $1.1 \pm 0.6 \text{ кг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2}$ , в сосняке зеленомошном –  $2.3 \pm 1.1 \text{ кг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2}$ . В данном случае заметная разница в величинах эмиссионного потока на наш взгляд может быть вызвана существенными различиями в условиях увлажнения участков, включающими различия в представителях живого напочвенного покрова.

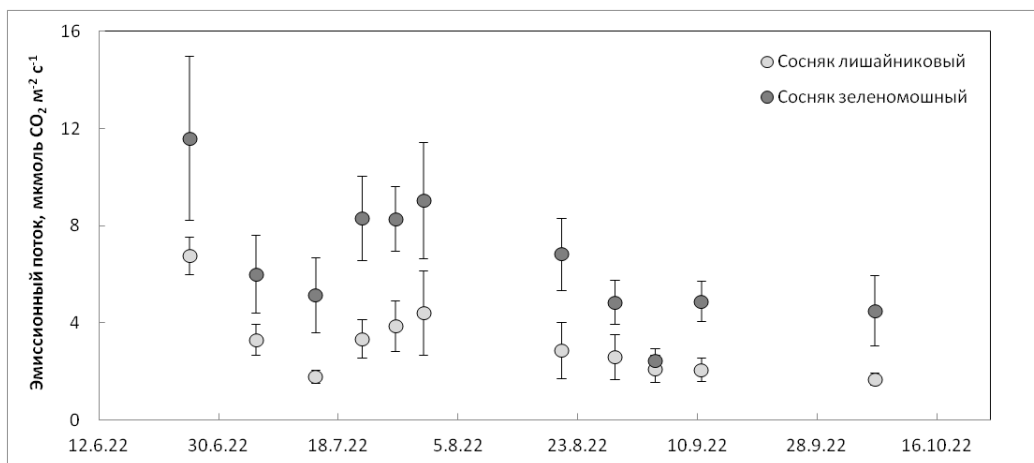


Рисунок 1. Эмиссионные потоки  $\text{CO}_2$  с поверхности почвы в сосняках лишайниковом и зеленомошном.

Суточный ход обменных потоков  $\text{CO}_2$  (NSE) представлен для второй половины летнего периода, после спада пиковых значений эмиссионных потоков в исследуемых экосистемах (рис. 2). Для сосняка лишайникового построен ряд непрерывных измерений

NSE. Редкие пробелы в данных обусловлены, как правило, перебоями с электропитанием.

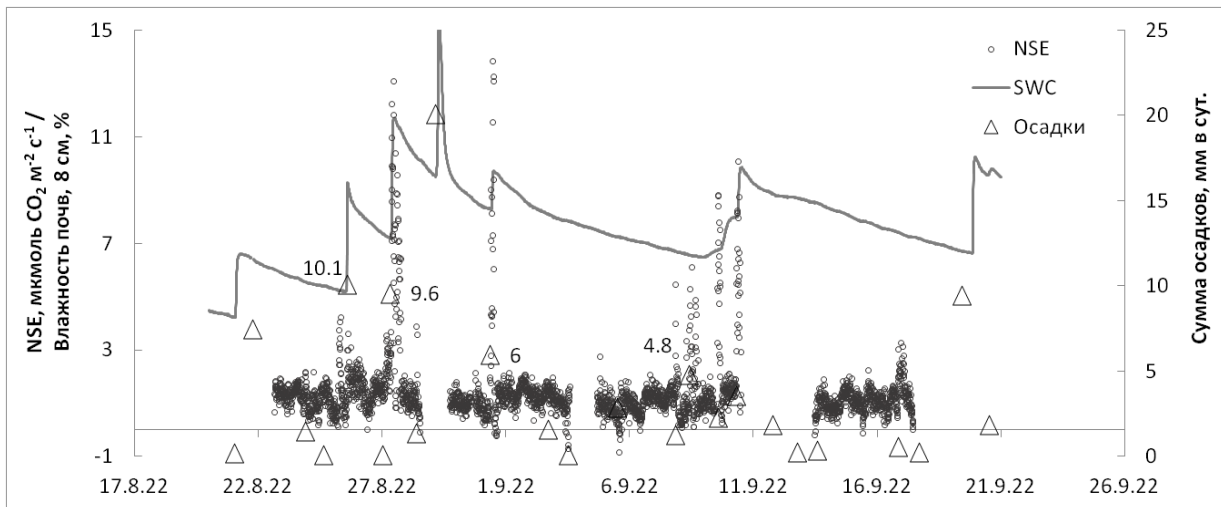


Рисунок 2. Обменные потоки CO<sub>2</sub> (NSE) в сосняке лишайниковом.

По результатам проведенных измерений была установлена довольно тесная связь всплесков потока NSE с атмосферными осадками более 5 мм в сутки. Подобный эффект (Birch effect) ранее уже отмечался для эмиссионных потоков CO<sub>2</sub> (Nuxman, 2004), однако для экосистем бореальной зоны его вклад считался незначительным. Полученные нами оценки показали, что после атмосферных осадков в количестве более 5 мм в сутки скорость потока NSE увеличивается в 4-13 раз по сравнению со значениями NSE до выпадения осадков. Для сосняка зеленомошного также характерен рост эмиссии CO<sub>2</sub> после выпадения осадков более 5 мм, скорость NSE увеличивается в 3-6 раз.

Таким образом, в ходе выполнения работы была выявлена существенная роль типа почвенного покрова в формировании эмиссионного потока CO<sub>2</sub> с поверхности почвы. В ходе изучения потоков NSE было установлено явное преобладание эмиссионных потоков над фотоассимиляционными в подчиненном ярусе для изученных экосистем. Также количественно оценен вклад эмиссионных потоков после выпадения атмосферных осадков более 5 мм. Учет подобных краткосрочных выбросов CO<sub>2</sub> в сезонном масштабе позволит более корректно рассчитать поток CO<sub>2</sub> с поверхности почвы в общем балансе углерода в экосистеме.

1. Lorenz K., Lal R. Carbon Sequestration in Forest Ecosystems. – Springer Dordrecht, 2010. – XIX. – 279 p. – DOI: 10.1007/978-90-481-3266-9.

2. Pukkala T. Carbon forestry is surprising // Forest Ecosystems. – 2018. – V. 5. – 11. – DOI 10.1186/s40663-018-0131-5.

3. Blaško R. et al. The carbon sequestration response of aboveground biomass and soils to nutrient enrichment in boreal forests depends on baseline site productivity // Science of the Total Environment. – 2022. – V. 838. – 156327. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156327.

4. Pugh T.A.M. et al. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics // PNAS. – 2019. – V. 116 (10). – P. 4382-4387. – DOI: 10.1073/pnas.1810512116.

5. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and flux // Global and Planetary Change. – 2015. – V. 128. – P. 24-30. – DOI: 10.1016/j.gloplacha.2015.02.004.

6. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.S., Eds. – Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2021. – DOI: 10.1080/03736245.2010.480842.

7. Kolari P. et al. Forest floor vegetation plays an important role in photosynthetic production of boreal forests // *Forest Ecology and Management*. – 2006. – V. 221(1-3). – P. 241-248. – DOI: 10.1016/j.foreco.2005.10.021.

8. Smith R.J. et al. Sensitivity of carbon stores in boreal forest moss mats-effects of vegetation, topography and climate // *Plant Soil*. – 2017. – V. 421. – P. 31-42. – DOI: 10.1007/s11104-017-3411-x\.

9. Zotino Tall Tower Observatory: [сайт]. URL: <https://www.zottoproject.org/> (дата обращения: 20.08.2023).

10. Специализированные массивы для климатических исследований: [сайт]. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index1.xhtml> (дата обращения: 21.08.2023).

11. Классификация и диагностика почв СССР. – Колос, 1977.

12. Huxman T.E. et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems // *Oecologia*. – 2004. – V. 141. – P. 254-268. – DOI 10.1007/s00442-004-1682-4.

## ВЗАИМОСВЯЗЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И ЭКОСИСТЕМНОГО ДЫХАНИЯ НА ОЛИГОТРОФНОМ БОЛОТЕ ЗАПОВЕДНИКА «КИВАЧ» РЕСПУБЛИКИ КАРЕЛИЯ

Прокопюк В.М., Линкевич Е.В., Гуляева Е.Н.

Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр РАН»,  
г. Петрозаводск, maltseva2@gmail.com

Болотные экосистемы составляют до 30 % территории Карелии и представляют собой уникальный запас углерода в торфяных залежах, который накапливался в течение длительного времени при определенных условиях окружающей среды. Глобальное увеличение температуры воздуха и увеличения количества осадков оказывает влияние на скорость трансформации углеродных запасов и эмиссию углекислого газа [1, 2]. Кроме того изменение количества осадков при повышенных температурах атмосферного воздуха приводит к переувлажнению верхних слоев торфяной залежи на болоте, тем самым увеличивая эмиссию паров воды [3]. В связи с этим северные болотные экосистемы из стока парниковых газов могут стать его источником [4]. Таким образом, климатические факторы являются наиболее общепринятыми величинами, по которым оценивают большинство исследователей интенсивность процессов поглощения и выделения углекислого газа.

Данная работа посвящена определению суточной динамики потоков выделения углекислого газа и паров воды с поверхности торфяной почвы естественного олиготрофного болота, а также взаимосвязи данных парниковых газов с микроклиматическими условиями.

Исследование проводили в государственном природном заповеднике «Кивач» (Кондопожский район, Республика Карелия) на олиготрофном кустарничково-пушицево-сфагновом болоте «Близкое» (62°26'83" N, 33°99'45" E). Согласно обновленной климатической классификации Кеппена-Гейгера объект относится к зоне субарктического континентального климата (Dfc), характеризующийся коротким прохладным летом и длинной теплой зимой [5]. Среднегодовая температура воздуха в районе исследования составляет 3°C. Самый холодный месяц года — январь (среднемесячная температура составляет от -9°C до -10°C), самый тёплый месяц года — июль (среднемесячная температура составляет от 16,0°C до 17,0°C). Период с положительными среднесуточными температурами составляет 190-200 дней [6]. Относительная влажность воздуха изменяется в диапазоне от 50 до 99 %. Годовое количество осадков колеблется от 600 до 700 мм. Годовая величина испаряемой влаги с поверхности почв на юге Карелии составляет около 420 мм. Среднегодовые величины общей облачности – 7-8 баллов, число дней без солнца составляет 120-130 дней за год [6]. Суточное измерение эмиссии углекислого газа и паров воды с поверхности почвы проводили на модельных площадках с мая по август камерным методом. Микрорельеф на модельных площадках грядово-мочажинный. В мохово-лишайниковом ярусе доминируют *Sphagnum angustifolium* (Russow) С.Е.О. Jensen и *Sphagnum divinum* Flatberg & K. Hassel, в растительном покрове встречаются *Eriophorum vaginatum* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Vaccinium oxycoccos* L., *Andromeda polifolia* L., *Betula nana* L. Разреженный древесный ярус состоит из *Pinus sylvestris* L. 3-4 м высотой. Уровень грунтовых вод в период измерений варьировался в диапазоне 20-30 см. Болото подстилается глинами. Мощность торфяной залежи в месте измерения поток составляла 1,5 м.

Определение концентрации углекислого газа, паров воды, а также температуры почвы, атмосферное давление и температуру внутри камеры проводили многоканальной автоматической системой инфракрасного газоанализатора SF-9000 (LICA, Китай).



Одновременно с измерениями потоков парниковых газов регистрировались микроклиматические факторы (температура, давление, освещенность, видимое излучение, фотосинтетическая активная радиация, осадки, скорость и направление ветра, уровень ультрафиолета, точка росы) с использованием метеостанции SOKOL M1 (Техавтоматика, Россия).

Исследование показало, что период измерения с мая по август характеризуется повышением атмосферного давления в дневные часы от 101331 в мае до 101655 Па в августе, высокой амплитудой температур ( $\Delta T$ , °C) и высокой относительной влажностью ( $W_{\text{ср.}}$ , %<sub>отн.</sub>) (рис. 1).

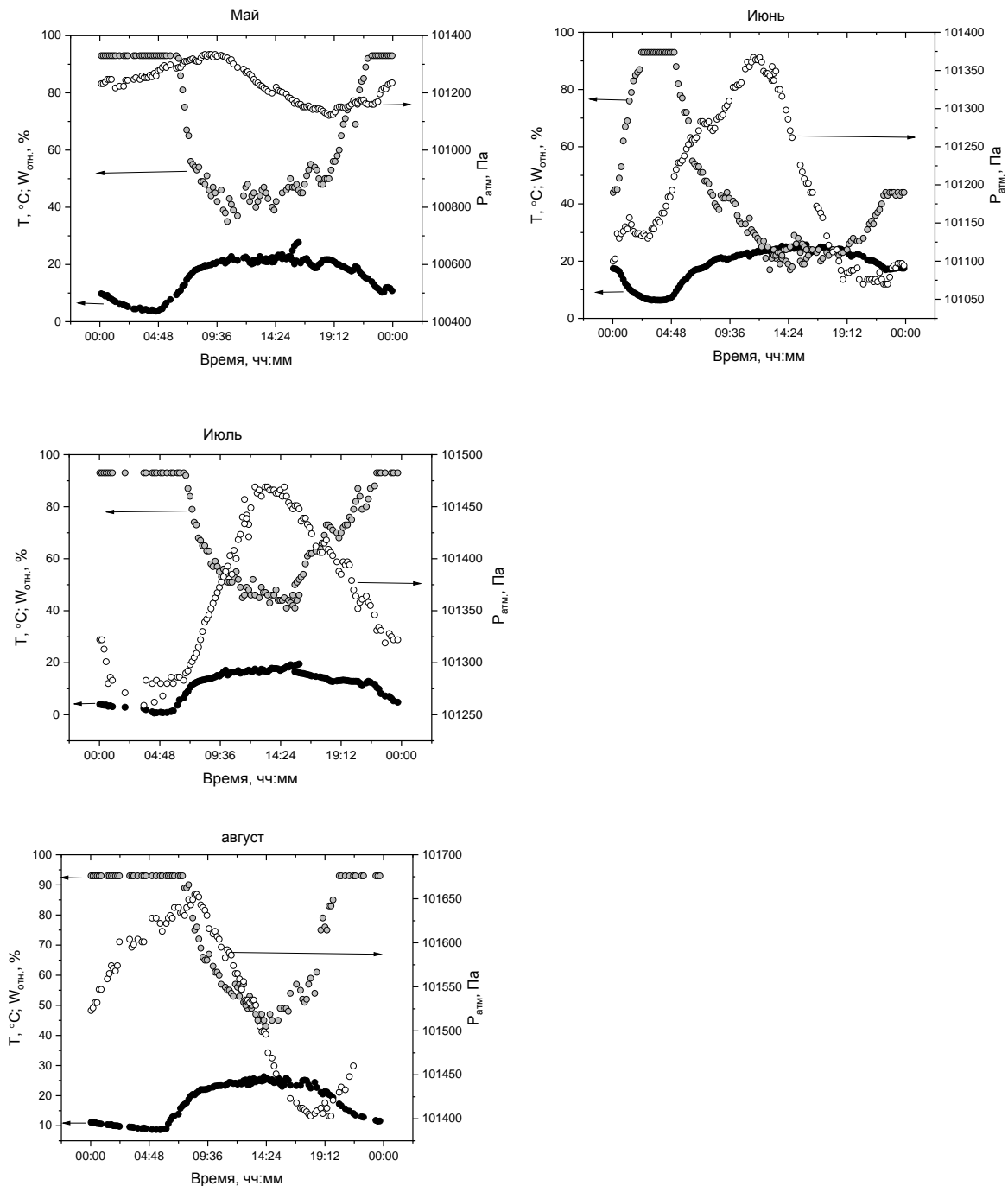


Рисунок 1. Суточные изменения температуры, давления и влажности во время

регистрации эмиссии углекислого газа и паров воды по данным метеостанции  
SOKOL M1.

В таблице 1 приведены результаты среднесуточных концентраций эмиссии углекислого газа и паров воды. Суточные измерения  $\text{CO}_2$  в мае показали, что концентрация парникового газа довольно низкая и составляет  $1,6 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ . При этом кривая, описывающая суточную динамику, имеет два максимальных значения эмиссии: с 05:00 до 17:00 и с 17:00 до 00:00 (рис. 2). Наибольшее значение экосистемного дыхания зафиксировано в июне. Далее с увеличением количества осадков (июль, август) и увеличении уровня болотных вод наблюдается спад эмиссии углекислого газа до  $1,12 \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ . При этом характер зависимости суммарного дыхания ( $R_{\text{eco}}$ ) во времени сохраняется (рис.2). Кроме того, наблюдаемое увеличение  $T_{\text{ср.}}$  почвы обусловлено высоким количеством осадков и высокой температурой воздуха, что способствовала увеличению уровня болотных вод. При данных условиях торф имеет более высокую теплопроводность и, следовательно, имеет место более высокий прогрев поверхностных слоев торфяной залежи.

**Таблица 1. Характеристики микроклиматических условий в измерительной камере и атмосферного воздуха, эмиссии парниковых газов на болоте «Близкое».**

Показатель	Периоды измерений, 2023 г.			
	23 – 24 мая	13 – 14 июня	10 – 11 июля	15 – 16 августа
$R_{\text{eco}}, \text{ гС}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$	1,6	1,89	1,63	1,12
$\text{C}(\text{H}_2\text{O})_{\text{пар}}, \text{ г}/\text{м}^3$	8,6	7,2	7,7	12,0
$T_{\text{ср. почвы}}, \text{ }^\circ\text{C}$	11,6	12,3	12	18,3
$P_{\text{атм. ср. в камере}}, \text{ Па}$	100876	100860	100922	101216
	Микроклиматические характеристики			
$T_{\text{макс.}}, \text{ }^\circ\text{C}$	27,3	25,8	20,9	25,9
$T_{\text{мин.}}, \text{ }^\circ\text{C}$	3,7	6,5	0,63	8,7
$T_{\text{ср.}}, \text{ }^\circ\text{C}$	17,4	18,8	12,4	19,5
$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	23,6	19,3	20,3	17,2
$P_{\text{атм. ср.}}, \text{ Па}$	101222	101204	101294	101544
$W_{\text{ср.}}, \text{ \%отн.}$	67,0	44,0	67,0	72,5
Количество осадков за сутки до измерения, мм	0,3	0	2,0	11,0
Количество осадков между периодами измерений, мм	15,1	32,1	37,1	190,6

Необходимо отметить, что концентрация водяного пара оказалась наиболее высокой в конце лета по сравнению с измерением в мае и составила  $12 \text{ г}/\text{м}^3$ . Таким образом, концентрация парникового газа  $\text{H}_2\text{O}$  оказалась в 12 раз выше эмиссии  $\text{CO}_2$  на естественном болоте.

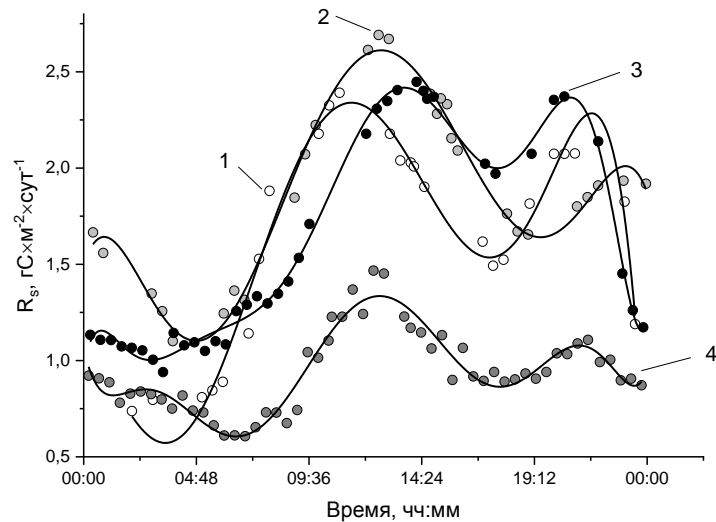


Рисунок 2. Суточная динамика эмиссии углекислого газа: 1 – май ( $R^2 = 0,96$ ), 2 – июнь ( $R^2 = 0,98$ ), 3 – июль ( $R^2 = 0,99$ ); 4 – август ( $R^2 = 0,9$ ).

Проведенный впервые мониторинг суточных измерений парниковых газов на олиготрофном болоте на территории Карелии показал, что особые климатические условия региона, такие как высокая влажность, обусловленная значительной долей водоемов и количеством осадков, атмосферное давление и температура воздуха, являются определяющими факторами характера эмиссии углекислого газа и паров воды. Полученные результаты указывают на значительную концентрацию паров воды в период измерений, достигающую до  $12 \text{ г/м}^3$  в августе при максимальном количестве осадков 11 мм за сутки до измерений. Понижение  $T_{\text{ср.}}$  атмосферного воздуха в июле объясняет увеличение растворимости углекислого газа в воде, выделяемого с поверхности болота, что привело к снижению эмиссии  $\text{CO}_2$ . Возросшее количество осадков в августе также способствовало усилению поглощения  $\text{CO}_2$  и значительно снизило суммарное экосистемное дыхание.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания КарНЦ РАН № FMEN-2022-0018.

1. Лапшина Е.Д., Дюкарев Е.А., Заров Е.А., Алексейчик П., Нийп Е., Филиппова Н.В., Мамарелла И., Филлипов И.В., Ганасевич Г.Н., Блойтен В. И др. Строение и функционирование болотных экосистем на территории полевого стационара Мухрино: результаты 10-летних исследований // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее. – 2021. – С. 33-34.

2. Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах / А. М. Алферов, В. Г. Блинов, М. Л. Гитарский [и др.]. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2017. – 279 с.

3. Eltahir E.A.B. A soil moisture–rainfall feedback mechanism: 1.Theory and observations // Water resources research. – 1998. – Т. 34. – № 4. – С. 765-776.

4. Koven C.D., Ringeval B., Friedlingstein P., Ciais P., Cadule P., Khvorostyanov D., Krinner G., Tarnocai C. Permafrost carbon-climate feedbacks accelerate global warming. // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2011. – №108. – P. 14769-14774

5. Kotttek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated // Meteorologische Zeitschrift. – 2006. – Vol. 15, № 3. – 259-263

6. Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды / Л. Е. Назарова, Ю. Й. Сыстра, А. Д. Лукашов [и др.]; Карельский научный центр РАН. – Петрозаводск : Карельский научный центр Российской академии наук, 2003. – 261 с.

*Научное издание*

XV СИБИРСКОЕ СОВЕЩАНИЕ И ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
ПО КЛИМАТО-ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ МОНИТОРИНГУ

МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ

Публикуется в авторской редакции,  
в соответствии с оригинал-макетом заказчика