



Мэп
Мейкер



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

Материалы

V Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск, 23–25 ноября 2022 г.



ISBN 978-5-9624-2119-3

УДК 556.5+551.5(470+571)(063)

ББК 26.22:26.23(2Р)л0

C56

Редакционная коллегия:

Е. Н. Сутырина, канд. геогр. наук (отв. ред.); И. В. Латышева, канд. геогр. наук; С. Ж. Вологжина, канд. геогр. наук

Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 23–25 ноября 2022 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ» ; отв. ред. Е. Н. Сутырина. – Иркутск : Издательство ИГУ, 2023. – 1 электронный оптический диск (CD-ROM). – Заглавие с этикетки диска. <https://doi.org/10.26516/978-5-9624-2119-3.2023.1-455>

ISBN 978-5-9624-2119-3

Материалы содержат результаты исследований по направлениям: «Актуальные проблемы подготовки кадров в сфере гидрометеорологии», «Мониторинг, моделирование и прогнозирование состояния водных объектов», «Погода и климат. Мониторинг и прогнозирование», «Опасные гидрометеорологические явления и процессы», «Влияние климатических изменений на трансформацию природных и социально-экономических условий», «Региональные особенности атмосферных процессов», «Современные методы и средства гидрометеорологических наблюдений», «Современные информационные системы в гидрометеорологии». Предназначено для специалистов в области гидрометеорологии, работников научных и образовательных учреждений, аспирантов и студентов.

Авторы статей несут полную ответственность за содержание статей, за соблюдение законов об интеллектуальной собственности и сам факт их публикации. Мнение и выводы авторов статей могут не совпадать с мнением редакции и членов редколлегии.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Иркутский государственный университет»

664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1; тел. +7 (3952) 51-19-00

Издательство ИГУ, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124

тел. +7 (3952) 52-18-53; e-mail: izdat@lawinstitut.ru

Подписано к использованию 27.02.2023. Тираж 15 экз. Объем 75,5 Мб.

Тип компьютера, процессор, частота:

32-разрядный процессор, 1 ГГц или выше

Оперативная память (RAM):

256 МБ

Необходимо на винчестере:

320 МБ

Операционные системы:

ОС Microsoft® Windows® XP, 7, 8 или 8.1, ОС Mac OS X

Видеосистема:

Разрешение экрана 1024x768

Акустическая система:

Не требуется

Дополнительное оборудование:

Не требуется

Дополнительные программные средства:

Adobe Reader 6 или выше



МЭП А Мейкер



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

Материалы
V Всероссийской
научно-практической
конференции
Иркутск,
23–25 ноября
2022 г.



ISBN 978-5-9624-2119-3

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»

Географический факультет

НПЦ «Мэп Мейкер»

ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»

ФГБУН Институт солнечно-земной физики СО РАН



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

Материалы

V Всероссийской научно-практической конференции

Иркутск, 23–25 ноября 2022 г.



ISBN 978-5-9624-2119-3

СОДЕРЖАНИЕ

СЕКЦИЯ 1. АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В СФЕРЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ	
Шмелькин Ю. Л., Юсупов Ю. И. Использование технологии ГИС Метео в образовании метеорологов	9
Бархатова О. А. Реализация ОПОП по направлению «Гидрометеорология» по ФГОС 3++	14
СЕКЦИЯ 2. МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ	
Абасов Н. В., Петрухина В. А., Бердников В. М., Бережных Т. В., Осипчук Н. В. Экспедиционные исследования бассейнов р. Ульда и Торейских озер в 2022 г.	23
Амельченко Ю. А., Крамарева Л. С., Суханова В. В., Шамилова Ю. А., Лотарева З. Н., Корниева Л. А. Мониторинг паводковой обстановки с использованием спутниковых данных на примере наводнения на реке Амур в 2021 году	30
Андреев Ф. М., Сутырина Е. Н. Статистическая обработка гидрологических данных с помощью инструментов языка программирования Python	37
Болданова Е. В. Проверка точности водных разностных индексов по данным ДЗЗ для оценки береговой линии оз. Байкал	42
Бутаков Н. Ю., Рубинштейн К. Г. Предварительные результаты прогноза гидрологических характеристик по совместной модели атмосфера-море для Белого моря в летний период	45
Величко М. К., Шорникова Е. А. Сезонная динамика гидрохимических показателей озерных вод Сургутского района	52
Гайдукова Е. В., Яновская А. О., Дрегваль М. С., Батмазова А. А. Долгосрочный прогноз стока рек АЗРФ с использованием регрессионных зависимостей	59
Кирпичникова Н. В., Воронина К. П., Хорошевская В. О. Анализ систем мониторинга на разных уровнях организации в оценке динамики гидрохимических показателей водных объектов и источников загрязнения	67
Лебедева Л. С. Влияние таликов на речной сток в условиях сплошной криолитозоны Центральной Якутии	74
Потапова Е. В., Михалева А. И., Копылова А. А. Водные объекты как каркас устойчивого развития населенных пунктов	82
Прасолов С. Д., Забелина С. А., Климов С. И., Чупаков А. В., Покровский О. С. Поток метана с поверхности бореальных озер европейского севера России	85
Симонов М. А., Полетаева В. И., Бархатова О. А. Исследование гидрохимических показателей р. Черемшанки	91

Стом А. Д., Балаян А. Э., Саксонов М. Н. Биотестирование экотоксичности мочевины на основе флюоресценции хлорофилла клеток водорослей	97
Хорошевская В. О., Голубкина М. А. Проблемы качества воды оз. Гусиное (Республика Бурятия)	101
Шевелев М. А. Расчет обеспеченного объема озера	106
Ясинский Н. С., Гриненко М. А., Полунин А. Я., Васильева Е. А. Прогнозирование речного стока с помощью комплекса GISMETEO.HYDRO	111

СЕКЦИЯ 3. ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Абрамов Д. А., Макарьева О. М., Землянскова А. А., Осташов А. А., Нестерова Н. В. Развитие сети геокриологического мониторинга Магаданской области: первые результаты 2021–2022 гг.	119
Агальцов А. А., Васильев Р. В. Проверка геострофичности вариаций ветра на нейтральной верхней атмосфере в периоды геомагнитных бурь	126
Белоусова Е. П., Вологжина С. Ж., Латышева И. В., Лощенко К. А. Циркуляционные факторы изменения климата Иркутской области	133
Данилович И. С., Костюченко И. В. Современные тенденции ветрового режима на территории Беларуси в условиях трансформации климата	140
Киселева Е. М., Волобуева О. В. Восстановление синоптического положения для прогнозов погоды	147
Латышева И. В., Лощенко К. А., Золотухина Е. Ю., Москалев Н. С., Мустаева П. А. Климатические условия Иркутской области	155
Мазуркин П. М. Распределение минимальной и максимальной температуры воздуха в апреле 2022 года на территории России и СНГ	161
Мазуркин П. М., Кудряшова А. И. Закономерности динамики и взаимосвязей между среднемесячной температурой, количеством осадков и суточными максимальными осадками	171

СЕКЦИЯ 4. ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

Баданов А. Ю., Юсупов Ю. И. К вопросу о сравнении диагностики областей глубокой влажной конвекции и сопутствующих метеорологических явлений с использованием спутниковых данных и данных метеорологических радиаров	181
Банщикова Л. С., Агафонова С. А., Сумачев А. Э. Особенности формирования заторов на Нижней Печоре в задачах разработки противозаторных мероприятий	188
Вазаева Н. В., Чхетиани О. Г., Крамар В. Ф. О субмезомасштабных структурах в пограничном слое атмосферы и их связи с экстремальными событиями	194
Гришаев М. В., Волкова М. А., Чурсин В. В. Комплексный алгоритм выявления пространственных зон обледенения по авиационному маршруту	200
Дегтярева Т. В., Волкова М. А. Циркуляционные условия формирования опасных явлений на территории Обь-Иртышского междуречья	206
Дронова Е. А., Авдеев С. М., Асауляк И. Ф. Динамика «волн жары» на территории Санкт-Петербурга	210

Збиранник А. А. Исследование положительных аномалий приповерхностной температуры воздуха по данным реанализа ERA5	216
Калмыкова О. В. Распознавание угроз образования смерчей над Черным морем на базе машинного обучения	221
Кравец К. А., Нечепуренко О. Е., Кужевская И. В., Чурсин В. В. Пространственно-временной анализ грозовой активности выше 60° с. ш.	230
Магрицкий Д. В., Головнин К. И., Севастьянова Л. Ю. Параметризация наводнений в устье Печоры посредством комбинирования стационарного и спутникового мониторинга	236
Медведько М. В., Гледко Ю. А. Чрезвычайные ситуации метеорологического характера на территории Беларуси	245
Нагуманова А. С. Сезонный ход опасных метеорологических явлений на территории аэропорта Гумрак	249
Озерова Н. А. Исследования тропических циклонов северо-западной части Тихого океана	253
Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В., Кулижникова Л. К. Прогноз зарождения полярных мезоциклонов на основе индексов конвективной неустойчивости с региональными пороговыми значениями и построение прогностических траекторий их перемещения	258
Рысалиева Л. С. Оценка пространственно-временного распределения SPI на территории Северного Казахстана	268
СЕКЦИЯ 5. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ПРИРОДНЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ	
Авдеев С. М., Дронова Е. А., Асауляк И. Ф. Оценка агрометеорологических условий выращивания гречихи посевной (<i>Fagopyrum esculentum Moench.</i>) на территории Алтайского края	275
Асауляк И. Ф., Авдеев С. М., Дронова Е. А. Агроклиматическая оценка условий возделывания озимой пшеницы по данным наземных и спутниковых наблюдений в Белгородской области	282
Землянскова А. А., Макарьева О. М., Шихов А. Н., Нестерова Н. В., Осташов А. А., Алексеев В. Р. Научный полигон Аянмангындиская наледь: комплексный подход изучения процессов водообмена	286
Мельников Ю. И. Fauna птиц Восточной Сибири: потепление климата и его последствия	292
Постников А. Н. Об испарении с поверхности снега в арктической зоне России в условиях изменения климата	302
Синюкович В. Н. Особенности современных колебаний стока Енисея и Ангары	309
Смирнов И. А. Оценка климатической устойчивости урожаев озимой пшеницы на территории Центрально-Черноземного экономического района	314
Троицкая Е. С., Шимараев М. Н. Случаи массового развития интрузий в Южном Байкале и их связь с процессами циркуляции атмосферы	320

СЕКЦИЯ 6. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Гордеева С. М., Малинин В. Н. О межгодовой изменчивости годового стока реки Печоры	329
Ладохина Е. М., Рубинштейн К. Г. Воспроизведение региональных особенностей атмосферных процессов в регионе Санкт-Петербурга с учетом реального распределения типов урбанизированной поверхности	333
Лощенко К. А., Белоусова Е. П., Вологжина С. Ж., Развозжаев А. И. Климатические риски на территории Сибирского федерального округа	339
Магрицкий Д. В. Климатические изменения на северо-востоке азиатской части России	345
Нестерова А. О., Волобуева О. В. Влияние синоптических процессов на миграцию птиц в районе аэродрома Пулково	354

СЕКЦИЯ 7. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Балагуров А. М. Соответствие качества аэрологических данных потребностям российских пользователей	362
Бобровский А. П., Дьяченко Н. В., Е. Ю. Михтеева, Потапова И. А., Скобликова А. Л., Хлябич П. П., Яковleva Т. Ю. Определение фоновой за- светки слабо замутненной атмосферы и ее влияние на точность определения прозрачности	372
Гагарин В. Е., Кошурников А. В., Фролов Д. М., Додобоеv Э. И., Набиев И. А. Изучение криолитозоны Зеравшанского и Гиссарского хребтов	377
Демидов Н. Э., Веркулич С. Р., Анисимов М. А., Угрюмов Ю. В. Концепция и первые результаты проекта создания государственной системы мониторинга многолетней мерзлоты РФ на базе наблюдательной сети Росгидромета	384
Ильчева Е. А., Павлов М. В., Ушканов А. А., Чалов С. Р., Морейдо В. М., Кобылкин Д. В. К вопросу о распределении стока в устьевых системах псевдodelт западного побережья озера Байкал	388
Латышева И. В., Потемкин В. Л., Макухин В. Л. Исследование про-цессов осаждения аэрозолей на акваторию озера Байкал	397
Луцкин Е. С., Шиховцев М. Ю., Хуриганова О. И. Предварительные результаты измерения общей ртути в атмосферных осадках в теплый период в Южном Прибайкалье	402
Сокolina A. P., Volobueva O. V. Методы и средства наблюдений за космической погодой и ее влияние на полеты воздушных судов	409
Таюрская А. П., Кумукова А. М. Особенности разработки и согласования планов мероприятий по снижению выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях на территории Иркутской области	418

СЕКЦИЯ 8. СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

Абрамов Д. В., Айзель Г. В. К вопросу о применении глобальных источников информации в гидрологическом моделировании с помощью методов машинного обучения	425
Найденов П. А., Сутырина Е. Н. Современные методы автоматизации анализа ветровых характеристик	432
Романский С. О., Вербицкая Е. М. О быстродействии расчетов модели WRF-ARW на кластере CRAY	438
Холодов Е. И., Давиденко А. Н., Киселев А. А. Возможности геоинформационной системы «Арктика-М» для решения задач оперативной метеорологии	443
Сутырина Е. Н., Антонова Т. И. Анализ прохождения паводков на р. Ии в 2019 году с использованием гидравлической модели HEC-RAS	450

Секция 1

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ПОДГОТОВКИ КАДРОВ
В СФЕРЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ**

УДК 551.509.21

Использование технологии ГИС Метео в образовании метеорологов

Ю. Л. Шмелькин, Ю. И. Юсупов (usupov@gismeteo.com)

ООО «НПЦ «Мэп Мейкер», Москва

Аннотация. Рассматриваются вопросы использования Географической информационной системы (ГИС) в вузах при обучении инженеров-метеорологов. Технология ГИС Метео является основным инструментом для ежедневной подготовки и анализа метеорологических карт. Программные средства ГИС Метео целесообразно включить в дополнительный спецкурс для студентов-метеорологов.

Ключевые слова: географическая информационная система, анализ метеорологических карт, подготовка студентов-метеорологов.

Технология ГИС Метео разработана в ООО «НПЦ “Мэп Мейкер”» специально для использования в оперативно-производственной работе метеорологами и специалистами смежных специальностей (гидрологами, авиационными метеорологами, агрометеорологами и т. д.) [1]. После проведения межведомственных испытаний, автоматизированные рабочие места (АРМ), созданные на базе этой технологии, были рекомендованы Росгидрометом для использования во всех подразделениях для работы дежурных синоптиков и метеорологов различных специальностей. В первую очередь эти комплексы предназначены для производства краткосрочного прогноза погоды, но могут быть использованы и для анализа климатических данных, проведения научных исследований, а также для обучения студентов, будущих специалистов-метеорологов. ООО «НПЦ “Мэп Мейкер”» имеет лицензию Росгидромета на определение метеорологических и климатических характеристик окружающей среды, на подготовку и предоставление потребителям прогностической, аналитической и расчетной метеорологической и климатологической информации, а также на формирование и ведение метеорологических банков данных.

В настоящее время комплексы ГИС Метео установлены примерно в 300 организациях нашей страны. Такие комплексы с 2009 г. применяются управлениями и центрами по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета во всех субъектах Российской Федерации, в большинстве авиаметеорологических организаций Росгидромета, а также в организациях МО, ВМФ, ФСБ, МЧС, РЖД [5].

Начиная с 1995 г. наша организация оказывает поддержку всем образовательным учреждениям Российской Федерации и Содружества Независимых Государств (СНГ), которые обеспечивают подготовку метеорологов и специалистов-смежников – агрометеорологов, океанологов и др.

Первая установка комплекса ГИС Метео для учебных целей произошла в 1997 г., когда заведующий кафедрой метеорологии и климатологии географического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ) профессор М. А. Петросянц (бывший директор Гидрометцентра России с 1968 по 1973 г.) увидел возможности комплекса ГИС Метео. Михаил

Арамаисович сделал важнейшее заключение – эти возможности должны демонстрироваться и использоваться в учебном метеорологическом бюро вместо использования там ядовитых карт на электрохимической бумаге. Практически незамедлительно на факультете были найдены два персональных компьютера (ПК), а также решен административный вопрос о получении доступа к текущим данным Главного вычислительного центра (ГВЦ) Росгидромета, нашлись модемы и канал связи для соединения факультетского ПК с ГВЦ, цветной принтер. Уже с весеннего семестра на 20-м этаже, на кафедре метеорологии и климатологии стали регулярно вывешивать красиво оформленные карты погоды, что начало привлекать внимание студентов. Рейтинг кафедры заметно повысился, возрос прием на кафедру. В силу высочайшего авторитета М. А. Петросянца в профессорско-преподавательской среде советской метеорологии, заведующие кафедр других вузов последовали за решением кафедры метеорологии и климатологии МГУ. В первую очередь это был профессор О. А. Подрезов из Кыргызско-российского славянского университета в Бишкеке, затем профессор Ю. П. Переображенцев, зав. кафедрой метеорологии из Казанского государственного университета, в 1998/99 учебном году к нам обратился профессор Н. А. Калинин, зав. кафедрой метеорологии и защиты атмосферы Пермского государственного университета. В дальнейшем с его кафедрой нас стали связывать тесные отношения по вопросу совместной работы над методическим пособием.

За более чем 25 лет эксплуатации ГИС Метео к нам обратились представители многих вузов России и СНГ по вопросам возможного их использования. В числе российских вузов это Московский, Казанский, Пермский, Саратовский, Санкт-Петербургский, Томский, Иркутский и Дальневосточный государственные университеты, Российский государственный гидрометеорологический университет, Военно-воздушная академия им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; из вузов СНГ – Белорусский государственный университет, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Кыргызско-Российский славянский государственный университет. Примерно с 2000 г. все вышеперечисленные вузы стали активно применять в учебной работе программные средства ГИС Метео. Следует также отметить, что эти программные средства теперь используются аспирантами вузов при подготовке докторских диссертационных работ. В настоящее время МГУ, Санкт-Петербургский, Иркутский и Белорусский государственные университеты, а также Военно-воздушная академия им. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина имеют возможность одновременной работы на 50 АРМах, остальные вузы ограничены 10 АРМами. Эта помощь всегда оказывалась бесплатно, но не бескорыстно, так как большинство выпускников этих учебных заведений поступают на работу в учреждения, оснащенные известными для них комплексами ГИС Метео, которые в настоящее время являются основным инструментом для ежедневной подготовки и анализа метеорологических карт.

Совместно с коллегами кафедры метеорологии Пермского ГУ в 2005 г. было выпущено учебное пособие по практическому применению ГИС Метео. В 2007 г. было выпущено второе издание, посвященное анализу и прогнозу погоды с помощью Геоинформационной системы Метео [2].

Основным источником данных ГИС Метео является База данных (БД) этого технологического комплекса, в которую в процессе круглосуточной оперативной работы записываются все доступные гидрометеорологические сводки всевозможных наблюдательных систем на суше, на море, в воздухе. Наиболее известны студентам сводки СИНП в коде КН-01 или аэрологические сводки в коде КН-04, но, кроме этого, в БД накапливаются еще около 40 различных видов сводок, не считая многочисленных прогностических данных в форме полей метеорологических величин. Эта БД пополняется круглосуточно с апреля 1997 г. Ежегодно ее оглавление в графической форме Синоптического бюллетеня передается в Государственный архив Центрального УГМС Росгидромета в Москве. Форма Синоптического бюллетеня позволяет анализировать характер общей циркуляции атмосферы над Северным полушарием, вести мониторинг ураганов и тайфунов, следить за развитием внутритропической зоны конвергенции, отслеживать циклональную активность и фронтальные перемещения за длительный период с 1998 г. по настоящее время. Соответствующая БД содержит все оперативные данные планеты всех наблюдательных платформ стран-членов Всемирной метеорологической организации (ВМО). Любые осмыслиенные по объему фрагменты этой базы данных доступны всем вузам через ООО «НПЦ «Мэп Мейкер» бесплатно.

Методическое пособие по работе с этой БД издавалось давно [6]. Однако в процессе изучения возможностей ГИС Метео лишь кафедра метеорологии и климатологии географического факультета МГУ обратилась к нам за информацией по этому вопросу для организации обучения студентов практической работе с данными наблюдений метеостанций, что неправильно в плане подготовки будущего метеоролога для работы с текущими фактическими погодными данными на современном компьютере. Следует отметить отставание учебных программ большинства вузов по тематике исходных данных, где уже с 2014 г. ВМО определила код BAFR основной формой международного обмена для данных наземных метеостанций.

Вернемся к возможностям ГИС Метео. Для мониторинга метеорологических данных согласно руководящим документам Росгидромета [3; 4] под приземными и высотными картами в атмосфере подразумеваются карты приземного давления и карты геопотенциала на стандартных изобарических поверхностях. Для этого используются следующие компоненты ГИС Метео: «География», «Синоптика», «Приземная наноска», «Наноска экстремальных температур и осадков», «Аэрология», «Аэрологическая наноска». Имеется большое количество компонент для всестороннего анализа текущей метеорологической информации – это компоненты «Погода», «МРЛ комплексная», «Спутник», «Траектории», «Вертикальные скорости», «Разрезы». Для специалистов смежных областей также имеются соответствующие возможности построения карт на основе компонент «Климат», «Агро», «Ледовая наноска», «Гидросиноптическая наноска», «Гидрология», «Авиационная наноска». Для ручной обработки карт и манипулирования с данными включены следующие средства – компоненты «Линии», «Значки», «Текст». Перечисленные компоненты полностью обеспечивают дежурного метеоролога всеми средствами анализа текущей метеорологической

обстановки. Для получения прогностических данных для отдельного пункта или обслуживаемой территории предлагаются дополнительные компоненты визуализации и анализа данных многочисленных прогностических моделей – это компоненты «Гриб», «Метео прогноз» и «Метео прогноз ГРИБ» различных прогностических центров. Следует отметить, что технология ГИС Метео может работать с выходной информацией любых гидродинамических моделей, если результаты представлены в форматах, предусмотренных Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Получается вполне современная технология работы студенческого бюро погоды.

Кроме известных методов анализа и прогноза атмосферных процессов, рекомендованных Руководством по краткосрочным прогнозам [3], в технологии ГИС Метео есть компоненты, предлагающие пользователю воспользоваться нетрадиционным изэнтропическим анализом.

Изэнтропическим анализом называется способ представления данных различных метеорологических полей с использованием потенциальной температуры в качестве вертикальной координаты. Исследование процессов в атмосфере с помощью изэнтропического анализа известно с 30-х гг. прошлого века. Однако в силу ряда причин этот способ не применялся так широко, как анализ метеорологических параметров на стандартных изобарических поверхностях. Основная трудность применения изэнтропического анализа состоит в том, что наклон изэнтропических поверхностей к горизонту примерно в 30 раз превосходит наклон изобарических поверхностей [7]. Поверхность Земли нельзя считать изэнтропической даже приближенно.

Изготовление карт изэнтропического анализа было практически невозможно без быстroredействующих компьютеров, кроме того, для выбора нужной изэнтропической поверхности, высота которой меняется в зависимости от времени года и широты, требовалось организовать удобный интерфейс с пользователем. Поэтому только в 90-х гг. прошлого века с созданием персональных компьютеров появились первые приложения для метеорологов, позволяющие оперативно рассчитывать метеорологические параметры на изэнтропических поверхностях.

Возврат к давно известному, но практически не применяемому способу представления метеорологических величин произошел из-за того, что в динамической метеорологии синоптического масштаба использование изэнтропического анализа с привлечением полей вертикальной составляющей потенциального вихря Эртеля, позволяет исследовать атмосферные процессы различной природы более детально, по сравнению с традиционными методами. Главным преимуществом изэнтропического анализа по сравнению с изобарическим является возможность более удобного и наглядного учета трехмерности некоторых атмосферных процессов. Есть и другие преимущества – лучше описываются фронтальные вертикальные структуры, проще определяется устойчивость атмосферы, которая при изэнтропическом анализе обратно пропорциональна расстоянию между изэнтропическими поверхностями. Изэнтропические карты потенциального вихря обладают хорошей разрешающей способностью, на них четко прослеживается роль горизонтальной адвекции воздушных масс в формирова-

нии особенностей погоды. Потенциальный вихрь на изэнтропических поверхностях ведет себя как квазилагранжева характеристика, поэтому эти карты являются идеальным подспорьем для «классического синоптика», привыкшего мыслить в терминах процессов трансформации индивидуальных воздушных масс.

В *p*-системе при анализе метеорологических параметров на изобарической поверхности трехмерность можно учесть, нанеся на карту значения вертикальных скоростей. Однако отслеживание адвекции воздушных масс на изобарической поверхности, может привести к ошибочным результатам из-за того, что в реальной атмосфере траектории воздушных частиц лежат в изобарической плоскости только при равенстве нулю вертикальных скоростей. При соблюдении в модели адиабатичности движение воздушных частиц происходит по изоэнтропическим траекториям. В приложении к задачам метеорологического обеспечения авиации при полетах в тропосфере возникает необходимость изучения динамической тропопаузы и сопутствующих явлений [7]. Этим вопросам посвящаются несколько компонент ГИС Метео, которые было бы полезно включить хотя бы в дополнительный спецкурс для студентов-метеорологов университетов. С помощью этих компонент комплекса ГИС Метео можно определять, например, сильные осадки в холодное время года, вызванные наклонной конвекцией, шквалы, возникающие в результате взаимодействия аномалии потенциального вихря в средней тропосфере с бароклиническими зонами нижней тропосферы.

Изэнтропический анализ не заменяет традиционный (изобарический) способ исследования явлений погоды, но может существенно дополнить его, позволяя по-другому посмотреть на процессы, происходящие в атмосфере, и в итоге помочь синоптику уточнить прогноз. В настоящее время метеорологи ведущих мировых центров обсуждают не сам факт необходимости изэнтропического анализа, а возможность сделать этот способ исследования атмосферных процессов удобным для использования в оперативной работе синоптиков.

Уже довольно давно (с конца прошлого или начала нынешнего века) в известных учебных заведениях США, Европы, Японии, Китая в учебной программе предусмотрено изучение изэнтропического анализа и полей потенциального вихря. Хотелось бы, чтобы наши будущие метеорологи могли также с уверенностью использовать на практике современные теоретические понятия динамической метеорологии – изэнтропический анализ, потенциальный вихрь Эртеля, векторную фронтогенетическую функцию.

Список литературы

1. Геоинформационная система «Метео» и состояние ее использования в метеослужбах России и ближнего зарубежья / А. А. Акуличесова, Л. В. Беркович, А. Ю. Соломахов, Ю. Л. Шмелькин, Ю. И. Юсупов // Метеорология и гидрология. 2001. № 11. С. 90–98.
2. Вольницева О. И., Смирнова А. А. Анализ и прогноз погоды с помощью Геоинформационной системы Метео : учеб. пособие. 2-е изд. Обнинск : Изд-во ВНИИГМИ-МЦД, 2007. 197 с.
3. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. С. 527–536.
4. Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации. Л. : Гидрометеоиздат, 1985. С. 134, 152–161.
5. Шмелькин Ю. Л. ГИС Метео в образовании метеорологов // Гидрометеорология и образование. 2020. № 4. С. 106–110.
6. Шмелькин Ю. Л. База данных оперативных гидрометеорологических наблюдений комплекса информационно-логической обработки для ЭВМ ЕС. Л. : Гидрометеоиздат, 1984. 34 с.
7. Юсупов Ю. И. Использование изэнтропического анализа в оперативном краткосрочном прогнозе погоды // Метеорология и гидрология. 2012. № 1. С. 42–49.

УДК 378.016

Реализация ОПОП по направлению «Гидрометеорология» по ФГОС 3++

О. А. Бархатова (barhat@geogr.isu.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Обозначается, что одной из приоритетных задач современного профессионального образования является подготовка высококвалифицированных специалистов, формирование у студентов общих и профессиональных компетенций, удовлетворяющих требованиям работодателей. Указывается, что рынок труда требует новый уровень образованности работника, основанный не только на теоретических знаниях, но и на практических умениях и компетенциях. Изучаются положительные и проблемные моменты при подготовке обучающихся по направлению «Гидрометеорология» на современном этапе.

Ключевые слова: ФГОС 3++, гидрометеорология, бакалавриат, магистратура.

С 2009 г. для высшего профессионального образования в России были введены в действие федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) 3-го поколения.

На этом этапе произошло, как считают многие преподаватели, осуществляющие подготовку гидрологов и метеорологов, не очень удачное объединение двух специальностей в единое направление «Гидрометеорология» и параллельно разделение обучения на два этапа: бакалавриат и магистратуру.

В этих образовательных стандартах к содержанию образовательных программ вузы получили небольшие ослабления в требованиях, в отличие от предыдущих очень жестких в реализации стандартов, в которых был обозначен четкий перечень обязательных дисциплин, вариативная часть программы, составляла не более 15 %. При этом для вуза было введено жесткое ограничение в части разработки внутреннего содержания основной профессиональной образовательной программы (ОПОП), она должна была находиться в пределах 10 % от общего объема.

Отличительной особенностью ФГОС 3-го поколения было введение компетентностного подхода в образовании, а именно реализации общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций, которые потребовали введения новых базовых дисциплин. Перечень и структура дисциплин, необходимых для формирования одинаковых компетенций, могли различаться в рамках разных образовательных программ.

При этом вузам и студентам предоставлялись достаточно большие академические свободы, особенно в плане дисциплин по выбору студента, доля которых должна была быть более 30 %. Этот подход был красив только в документе, в реальной жизни это приводило к увеличению нагрузки (на фоне сокращения ставок) и в непонимании выбора таких дисциплин студентами.

Начиная с 2014 г. был введен ФГОС 3+. На данном этапе было предложено разделить бакалавриат на два типа: академический и прикладной. Как показал

опыт последующих лет, такой «эксперимент» не закрепился в вузах. На сегодняшний момент подготовка по прикладному бакалавриату в вузах РФ отменена.

С 2020 г. все вузы России занимаются актуализацией реализуемых образовательных программ в соответствии с требованиями ФГОС 3++ [1; 2]. Введение ФГОС 3++ связано с необходимостью соответствия ФГОС Федеральному закону «Об образовании в Российской Федерации», т. е. соответствия п. 7 ст. 11. В данном пункте закреплено, что формирование требований ФГОС ВО к результатам освоения основных профессиональных образовательных программ должно осуществляться на основе соответствующих профессиональных стандартов с целью формирования у выпускников необходимых профессиональных компетенций [3].

По задумке Министерства науки и высшего образования РФ внедрение ФГОС 3++ должно давать вузам возможность более точно и оперативно реагировать на запросы рынка труда, конкурировать на российском и международных рынках образовательных услуг. В ФГОС 3++ появилось новое наименование компетенций – универсальные компетенции, которые являются расширением и несколько другой формулировкой общекультурных компетенций ФГОС ВО 3+.

При разработке ОПОП по направлению «Гидрометеорология» возник сложный момент в реализации требований ФГОС 3++, который состоит в описании трудовых функций, которые будут востребованы в ближайшее время и в более далекой перспективе, т. е. сопряженность профессиональных и образовательных стандартов.

Сложность заключалась в том, что на сегодняшний момент близкого к направлению «Гидрометеорология» нет ни одного утвержденного профессионального стандарта. С 2014–2015 гг. и по настоящий момент они находятся в стадии проекта. Это связано с тем, что инициировать профстандарты может только общественная организация. Росгидромет РФ является основным заказчиком на таких специалистов, но он не имеет право на разработку профессиональных стандартов. Созданный Консультационный совет по гидрометеорологическому образованию при Федеральной службе по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды посвятил несколько заседаний актуализации этого вопроса в 2021–2022 гг. На заседание были приглашены разработчики из НКО «Метеосоюз», которые пообещали к 2023 г. утвердить профстандарты «Метеоролог» и «Метеоролог-техник», но прискорбно то, что профессиональных стандартов «Гидролог» и «Гидролог-техник» нет даже в перспективе разработки.

ФГОС 3++ по направлению «Гидрометеорология» рекомендует использовать профессиональный стандарт 15 «Рыбоводство и рыболовство» (в сфере гидрохимия) – сфера мониторинга состояния атмосферы и гидросферы (вода суши и Мировой океан), процессов в атмосфере и гидросфере, что мало отражает специфику подготовки по специальностям гидрология и метеорология и тем более он был отменен в 2020 г., сразу же при вступлении в силу ФГОС 3++. Таким образом, это приводит внедрение ФГОС 3++ к еще более «рамочному» виду в силу невозможности «прямого сопряжения» ФГОС и профессионального стандарта.

Второй проблемой стало определение профиля (направленности), по которому будет проводиться обучение студентов по направлению «Гидрометеорология». При отсутствии профессиональных стандартов оставлять старое наименование профилей «Гидрология» и «Метеорология» не рекомендовано, так как это будет не соответствие аккредитационным требованиям. Поэтому приходится опираться не на область (области) профессиональной деятельности и сферу (сферы) профессиональной деятельности выпускников, а на тип (типы) задач и задачи профессиональной деятельности.

Для выхода из этого положения администрация географического факультета ФГБОУ ВО «ИГУ» обратились в Иркутской управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Научно-исследовательский институт солнечно-земной физики СО РАН, Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Лимнологический институт СО РАН, которые являются основными заказчиками специалистов данного направления.

Совместное обсуждение привело к формированию следующих профессиональных компетенций (табл. 1, 2).

Таблица 1

Обязательные профессиональные компетенции выпускников направления бакалавриата 05.03.04 «Гидрометеорология» и индикаторы их достижения

Задача	Наименование профессиональной компетенции	Наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
Научно-исследовательский тип задач		
Участие в проведении научных исследований в области гидрометеорологии в учреждениях науки и вузах под руководством квалифицированных научных сотрудников	Способен формулировать задачи научного исследования составлять аналитические обзоры накопленных мировой наукой сведений	Определяет круг задач в рамках поставленной цели научного исследования Реферирует научные труды, составляет аналитические научные обзоры
	Способен использовать знания, выбирать и использовать методы при решении научно-исследовательских задач в области гидрометеорологии	Применяет знания, подходы и методический аппарат для решения профильных научно-исследовательских задач
Оперативно-производственный тип задач		
Участие в выполнении расчетов и прогнозов, в оформлении документов и отчетности, имеющих гидрометеорологическую направленность	Способен принимать участие в работе учреждений в направлении сбора информации, выполнении расчетов и прогнозов, а также ведении документации в соответствие с установленными требованиями	Выполняет отдельные мероприятия, решает отдельные задачи под руководством более компетентных специалистов в рамках действующего на предприятии плана Ведет документацию и оформляет отчетность в соответствие с установленными требованиями
Осуществление работ в рамках проведения гидрометеорологических изысканий	Способен проводить изыскательские работы, составлять проектную документацию на основе проведения полевых и камеральных работ	Участвует в подготовительных, полевых и лабораторных работах Участвует в камеральных работах и подготовке отчетной документации изысканий

Задача	Наименование профессиональной компетенции	Наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
Участие в проектировании типовых мероприятий по охране окружающей среды	Способен выполнять расчетно-аналитические работы при оценках воздействия на окружающую среду от действующих и проектируемых хозяйственных объектов	Участвует в разработке экологических разделов проектной документации с учетом специфики намечаемой деятельности
Осуществление работ в рамках проведения оценки состояния и уровня загрязнения водных объектов рыбохозяйственного значения	Способен проводить обобщение и анализ материалов наблюдений за состоянием и загрязнением воды, производить оценку соответствия качества воды нормативам для водных объектов рыбохозяйственного значения	Выполняет обобщение и анализ материалов наблюдений за состоянием и загрязнением воды, участвует в оценке соответствия качества воды нормативам для водных объектов рыбохозяйственного значения
Технологический тип задач		
Выполнение технологических операций по подготовке аналитических и информационно-справочных материалов гидрометеорологической направленности с использованием программных средств и ГИС-технологий	Способен использовать стандартное и специализированное программное обеспечение (в том числе ГИС-технологии) для подготовки информационно-справочных и аналитических материалов, имеющих гидрометеорологическую направленность	Выполняет технологические операции по сбору, обработке, подготовке, анализу и интерпретации гидрометеорологической информации с применением вычислительной техники Использует приемы визуализации, представления и анализа космических снимков и геопространственных данных с использованием ГИС-технологий

Таблица 2

Обязательные профессиональные компетенции выпускников направления магистратуры 05.04.04 «Гидрометеорология» и индикаторы их достижения

Задача	Наименование профессиональной компетенции	Наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
Научно-исследовательский тип задач		
Организация и проведение научно-исследовательских работ в области гидрометеорологии в вузах и профильных организациях под руководством квалифицированных научных сотрудников	Способен формулировать цели и определять задачи научно-исследовательской деятельности в области гидрометеорологии	Формулирует цели, задачи и этапы научно-исследовательской деятельности Проводит реферативный обзор публикаций по тематике исследования, опубликованных в России и за рубежом
	Способен использовать теоретические знания и современные методы гидрометеорологических исследований при решении научно-исследовательских задач	Использует базовые теоретические представления при решении фундаментальных и прикладных задач в области гидрометеорологии Определяет методы сбора и анализа гидрометеорологической информации в рамках поставленной цели и задач научного исследования
Организационно-управленческий тип задач		
Организационное сопровождение проектной деятельности и	Способен принимать участие в организации и проведении специализированного гидрометеорологического	Знает специфику гидрометеорологического обеспечения различных сфер экономики и транспорта

Задача	Наименование профессиональной компетенции	Наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
обеспечение гидрометеорологической информацией органов территориального управления	обеспечения органов власти и различных потребителей гидрометеорологической информации	Принимает участие в работе учреждений Росгидромета и научно-исследовательских организаций под руководством более компетентных специалистов
Организация и проведение гидрометеорологических изысканий и экспертиз	Способен отбирать, анализировать и систематизировать гидрометеорологическую информацию с учетом специфики в рамках проведения гидрометеорологических изысканий и экспертиз	Проводит полевые и камеральные исследования, анализирует статистические данные в соответствии с поставленными задачами Готовит аналитические материалы гидрометеорологической направленности
Участие в подготовке прогнозистической информации о состоянии характеристик атмосферы и гидросфера с применением современных методов прогнозирования, геоинформационных систем и космических данных	Способен проводить анализ текущего состояния и ожидаемых гидрометеорологических параметров с использованием программных средств, геоинформационных технологий и методов дешифрирования космических снимков облачности и подстилающей поверхности Земли	Участвует в составлении и обосновании гидрометеорологических прогнозов на основе выходных данных гис-технологий Владеет методами дешифрирования космических снимков облачности и подстилающей поверхности Земли
Осуществление работ в рамках проведения оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха и водных объектов рыбохозяйственного значения	Способен проводить анализ данных мониторинга о состоянии атмосферного воздуха и поверхностных вод суши, анализировать результаты численных моделей переноса примесей, производить оценку соответствия качества воды нормативам для водных объектов рыбохозяйственного значения	Выполняет обобщение и анализ данных мониторинга и численного моделирования о состоянии параметров окружающей среды, участвует в оценке соответствия качества воды нормативам для водных объектов рыбохозяйственного значения
Организационно-управленческий тип задач		
Организационное сопровождение проектной деятельности и обеспечение гидрометеорологической информацией органов территориального управления	Способен принимать участие в организации и проведении специализированного гидрометеорологического обеспечения органов власти и различных потребителей гидрометеорологической информации	Знает специфику гидрометеорологического обеспечения различных сфер экономики и транспорта Принимает участие в работе учреждений Росгидромета и научно-исследовательских организаций под руководством более компетентных специалистов
Организация и проведение гидрометеорологических изысканий и экспертиз	Способен отбирать, анализировать и систематизировать гидрометеорологическую информацию с учетом специфики в рамках проведения гидрометеорологических изысканий и экспертиз	Проводит полевые и камеральные исследования, анализирует статистические данные в соответствии с поставленными задачами Готовит аналитические материалы гидрометеорологической направленности
Участие в подготовке прогнозистической информации о состоянии	Способен проводить анализ текущего состояния и ожидаемых гидрометеорологических параметров с использованием программных средств, геоинформационных технологий и методов дешифрирования космических снимков облачности и подстилающей поверхности Земли	Участвует в составлении и обосновании гидрометеорологических прогнозов на основе выходных данных гис-технологий

Задача	Наименование профессиональной компетенции	Наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
характеристик атмосферы и гидросфера с применением современных методов прогнозирования, геоинформационных систем и космических данных	ванием программных средств, геоинформационных технологий и методов дешифрирования космических снимков облачности и подстилающей поверхности Земли	Владеет методами дешифрирования космических снимков облачности и подстилающей поверхности Земли
Осуществление работ в рамках проведения оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха и водных объектов рыбохозяйственного значения	Способен проводить анализ данных мониторинга о состоянии атмосферного воздуха и поверхностных вод суши, анализировать результаты численных моделей переноса примесей, производить оценку соответствия качества воды нормативам для водных объектов рыбохозяйственного значения	Выполняет обобщение и анализ данных мониторинга и численного моделирования о состоянии параметров окружающей среды, участвует в оценке соответствия качества воды нормативам для водных объектов рыбохозяйственного значения
Технологический тип задач		
Использование ГИС-технологий и программных средств для визуализации и статистической обработки баз данных при решении научно-исследовательских и производственных задач в области гидрометеорологии	Способен использовать программные средства, гидрометеорологические информационные системы и выходные данные Росгидромета для решения производственных и научно-исследовательских задач	Владеет навыками использования программных средств для обработки гидрометеорологической информации с применением вычислительной техники Использует методы визуализации данных, графические и статистические методы анализа гидрометеорологической информации

Основываясь на формируемых компетенциях, было принято решение на ученом совете географического факультета ИГУ реализовывать следующие профили (направленности) по направлению «Гидрометеорология»:

– бакалавриат – «Информационные технологии в гидрологии» и «Информационные технологии в метеорологии»;

– магистратура – «Информационные технологии в гидрометеорологии».

Решением Ученого совета ИГУ было принято решение реализовывать универсальные компетенции единообразно для всех направлений бакалавриата и магистратуры, что позволит снизить нагрузку. Для этого в учебный процесс были внедрены онлайн-лекции и полностью онлайн-курсы (табл. 3).

Проблемным моментом является и набор обучающихся на направление бакалавриата «Гидрометеорология», так как современные школьники плохо представляют себе специальность гидролога и метеоролога. Поэтому помимо проведения профориентационных работ в школах принято решение организовать обучение на факультете по программе среднего профессионального образования (СПО), где на базе 9-го класса будет проводиться подготовка студентов, ориентированных на дальнейшее продолжение обучения уже на высшей ступени профессионального образования.

На протяжении многих лет также обсуждается вопрос замены набора вступительных испытаний при поступлении на направление «Гидрометеорология», например географии на физику. Это не представляется возможным в силу современных реалий. Связано это со многими моментами: противостоянием УМО по наукам о Земле, недостаточно хорошей подготовкой современных школьников по дисциплине «Физика» и со сложными заданиями ЕГЭ по этой дисциплине, в результате которых многие выпускники не могут преодолеть пороговые баллы.

Таблица 3

Формирование универсальных компетенций для направлений бакалавриата

Компетенция		Дисциплина	Форма реализации
Код	Наименование		
УК-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач	Все виды практик	Оффлайн
УК-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений	Управление проектами	Онлайн-курс
УК-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде	Психология социального взаимодействия, саморазвития и самоорганизации	Онлайн-лекции, онлайн-практика
УК-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(ых) языке(ах)	Русский язык и культура речи Иностранный язык	Онлайн-лекции, онлайн-практика
УК-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах	История (История России. Всеобщая история) Философия	Онлайн-лекции, онлайн-практика
УК-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни	Психология социального взаимодействия, саморазвития и самоорганизации	Онлайн-лекции, онлайн-практика
УК-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности	Физическая культура и спорт Элективные курсы по физической культуре и спорту	Онлайн-лекции, онлайн-практика
УК-8	Способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов	Безопасность жизнедеятельности	Онлайн-лекции, онлайн-практика
УК-9	Способен использовать базовые дефектологические знания в социальной и профессиональной сферах	Основы инклюзивного взаимодействия	Онлайн-курс

Компетенция		Дисциплина	Форма реализации
Код	Наименование		
УК-10	Способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности	Экономическая культура и основы финансовой грамотности	Онлайн-курс
УК-11	Способен формировать нетерпимое отношение к коррупционному поведению	Модуль (в рамках дисциплины Безопасность жизнедеятельности) Антикоррупционная политика	Онлайн-курс

В заключение можно сказать, какие бы сложности не стояли перед педагогическим составом географического факультета ИГУ при подготовке обучающихся по направлению «Гидрометеорология» все они преодолимы и решаемы, так на сегодняшний момент решается вопрос возвращение к уровню профессионального образования специалитет, конечно, с учетом современных требований.

Список литературы

1. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон РФ от 31 дек. 2014 г. № 500-ФЗ // КонсультантПлюс : справочная правовая система.
2. Уровень высшего образования Бакалавриат. Направление подготовки 05.03.04 Гидрометеорология : feder. гос. образовательный стандарт высш. образования : утв. приказом Министерства образования и науки РФ от 7 авг. 2020 г. № 892 // КонсультантПлюс : справочная правовая система.
3. Уровень высшего образования Магистратура. Направление подготовки 05.04.04 Гидрометеорология : feder. гос. образовательный стандарт высшего образования : утв. приказом Министерства образования и науки РФ от 7 авг. 2020 г. № 899 // КонсультантПлюс : справочная правовая система.

Секция 2

МОНИТОРИНГ, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

УДК 556

Экспедиционные исследования бассейнов р. Ульдза и Торейских озер в 2022 г.

Н. В. Абасов (abasov_nv@rambler.ru), В. А. Петрухина (lera.petruhina@mail.ru),
В. М. Бердников (vladwen98@mail.ru), Т. В. Бережных (berejn@isem.irk.ru),
Н. В. Осипчук (eugene.os@mail.ru)

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск

Аннотация. Представлены реальные фактические данные измерений стока р. Ульдза и батиметрических характеристик Торейских озер по проведенной ИСЭМ СО РАН комплексной экспедиции в июне 2022 г. совместно с ФГБУ «Государственный природный биосферный Даурский заповедник» и ИПРЭК СО РАН на территории Даурского заповедника в монгольской и российской части. Показаны маршрут экспедиции и замеры гидрологических показателей р. Ульдза на 13 морфостворах в различных участках. Обнаружен искусственный отвод р. Ульдза в р. Тэлийн-Гол на монгольской стороне, что создает дополнительные проблемы с наполнением Торейских озер. Сделана предварительная оценка негативных последствий возможного завершения строительства проектируемого водохранилища (не согласованная с российской стороной) на р. Ульдзе на монгольской территории.

Ключевые слова: экспедиционные исследования, экспедиция, гидрологические характеристики, водность рек, трансграничные бассейны рек и озер, р. Ульдза, Торейские озера, проблемы осушения воды.

Проблема водности Торейских озер

Торейские озера – Барун-Торей и Зун-Торей расположены в трансграничном российско-монгольском природном объекте «Ландшафты Даурии», включенном в Список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Они являются остаточной частью крупного озера, которое когда-то занимало всю площадь Торей-Борзинского водораздела. Озера имеют непостоянный водный режим: за последние 200 лет они неоднократно высыхали и наполнялись водой с периодичностью около 30 лет.

Озеро Барун-Торей бессточное, имеет неправильную форму, вытянутую с севера на юг. Глубина оз. Барун-Торей относительно небольшая – около 4 м, длина 50,5 км, средняя ширина 11,1 км, площадь водной поверхности достигает 600 км². Озеро Барун-Торей имеет 2 притока: р. Ульдза (среднемноголетний годовой приток составляет 5,3 м³/с) и р. Ималка (приток с северной части с незначительным расходом 0,18 м³/с) [3].

Озеро Зун-Торей имеет округлые очертания, слабую изрезанность береговой линии. Его максимальная глубина составляет около 7 м, длина озера – 22,6 км, средняя ширина 13 км при площади водной поверхности – 300 км². Торейские озера между собой имеют протоки, заполняемые водой в случае, если уровень оз. Барун-Торей поднимается до отметки 596,5 м [4; 5].

Российская часть объекта Всемирного наследия включает территории Даурского государственного природного биосферного заповедника и его охран-

ную зону, а также большую часть государственного природного заказника федерального значения «Долина дзерена». Река Ульдза протекает через эти охраняемые природные территории, наполняя озера и водно-болотные угодья, являясь основным источником воды [6; 8].

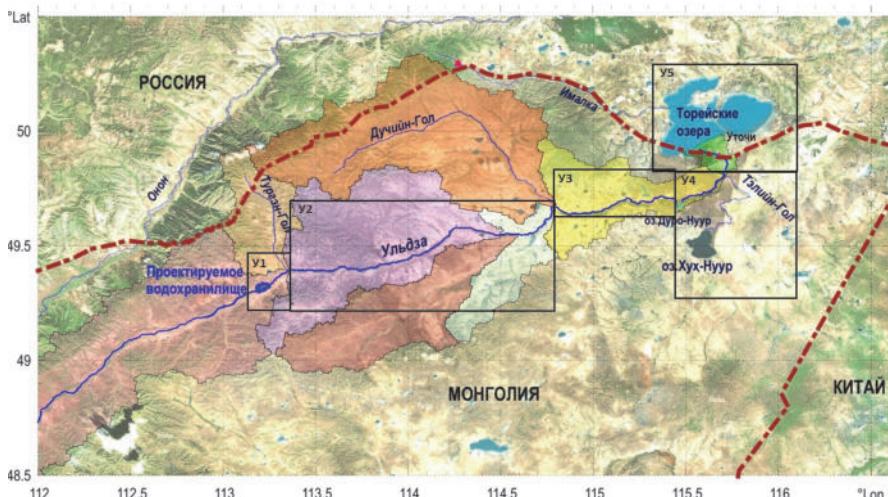


Рис. 1. Маршрут экспедиционных исследований в бассейнах р. Ульдза и Торейских озер

В июле 2020 г. в провинции Дорнод (Монголия) компания «Вэлмот» приступила к строительству плотины через реку Ульдза в 15 км от н.п. Наранбулаг (рис. 1). В конце 2020 г. на спутниковых снимках уже можно было увидеть основание 700-метрового сооружения, построенное поперек поймы реки. Строительство плотины началось без согласования с российской стороной. Официально обоснования с монгольской стороны вызвано необходимостью «предотвращения высыхания реки» [10; 11].

Поскольку большая часть водопотребления в монгольской части бассейна р. Ульдза приходится на добычу полезных ископаемых, проектируемое водохранилище, вероятно, предназначено для обеспечения устойчивого водоснабжения горнодобывающих предприятий, а также расширения орошаемого земледелия как второго по величине водопотребителя. В любом случае, создание плотины и водохранилища может вызвать существенное изменение естественного гидрологического режима р. Ульдза, а в дальнейшем и Торейских озер, что может привести к непоправимым экологическим последствиям и потере статуса Торейских озер как объекта Всемирного наследия [7].

За последние десятилетия наблюдался засушливый период в бассейне Торейских озер, из-за чего происходят негативные процессы в экосистеме Даурского заповедника. В связи с тем, что бассейн р. Ульдза является трансгранич-

ным для РФ и Монголии, а монгольская сторона приступила к созданию водохранилища на р. Ульдза, возникают риски ухудшения ситуации с водностью р. Ульдза и Торейских озер.

Для получения более достоверных оценок влияния строительства плотины на гидрологические характеристики Торейских озер, возникла необходимость экспедиционного обследования участка бассейна р. Ульдза от створа проектируемой плотины на территории Монголии до границы РФ, а также самих Торейских озер на территории РФ.

Описание маршрута экспедиционных исследований

При проведении предварительного анализа проблемы Торейских озер было выявлено отсутствие значительной части данных по стоку р. Ульдза на территории Монголии и уровням Торейских озер на территории РФ за последние годы, батиметрических характеристик озер и проток между ними, а также ряда других показателей. При поддержке ФГБУ «Государственный природный биосферный Даурский заповедник» и ИПРЭК СО РАН была организована комплексная экспедиция в бассейнах р. Ульдза на монгольской территории и Торейских озер на российской территории. Исследования проводились в сопровождении сотрудников Даурского заповедника с российской и монгольской стороны.

Экспедиционные исследования были проведены в период с 31 мая по 10 июня 2022 г. Перед проведением работ были предварительно изучено множество источников литературы [4–8] и имеющиеся материалы по уровням и стоку р. Ульдза [1; 9].

Во время экспедиционных исследований были выполнены следующие задачи:

- 1) УТОЧНЕНИЕ русла и основных притоков р. Ульдза;
- 2) уточнение места проектируемой плотины;
- 3) фиксирование изменений гидрологических показателей по руслу р. Ульдза;
- 4) исследование отвода части стока р. Ульдза в р. Тэлийн-Гол;
- 5) исследование притоков р. Ульдза на территории Монголии;
- 6) уточнение батиметрических характеристик Торейских озер.

Маршрут экспедиции состоял из 5 участков измерений (У1–У5) на территории Монголии вдоль русла р. Ульдза от границы проектируемой плотины до границы с РФ (рис. 1) по направлению течения реки. В российской части бассейна исследовалась территория Даурского заповедника, Торейских озер. В пунктах остановки, обозначенных на карте, проводились гидрометрические и геодезические измерения. На 9 измерительных пунктах были произведены замеры по морфостворам (пункты, обозначенные на карте красным кругом). На 5 участках были проведены следующие исследования (пункты, обозначенные на карте красным треугольником): описание территории, замер батиметрических характеристик, сбор гидрометеорологических данных.

Описание участков исследования

Участок I (У1) располагается от границы проектируемой плотины до р. Турген-Гол. Место, где запланированы работы по строительству плотины

(начатое в 2020 г. и в настоящий момент приостановлено), проектная длина которой 700 м, по состоянию на март 2022 г. (по предоставленным снимкам ранее проведенных экспедиций) представляет собой прорытую траншею, заполненную водой, протяженностью порядка 510 м. По данным экспертных оценок расход р. Ульдза в месте проектируемого водохранилища составляет $4,5\text{--}5,5 \text{ м}^3/\text{с}$. На измерение расходов в данной местности во время экспедиции 2022 г. не было дано разрешение с монгольской стороны.

Участок 2 (У2) располагается между притоками р. Ульдза: р. Турген-Гол и р. Дучийн-Голи и является продолжительным (около 190 км по прямой) и важным для уточнения гидрологических характеристик р. Ульдза (уклонов, расходов и т. д.).

Участок 3 (У3) располагается от р. Дучийн-Гол и оз. Дуро-Нуур. По руслу р. Ульдза на расстоянии 24 км от р. Дучийн-Гол находится болотистая местность, общей площадью равная $27,6 \text{ км}^2$, за счет которого идет потеря стока р. Ульдза около $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$ (11 %) по оценке измеренных расходов и испарения до и после его границы.

Участок 4 (У4) располагается от начала оз. Дуро-Нуур до отвода р. Ульдза в р. Тэлийн-Гол и в настоящее время является накопителем воды со смешением максимальных расходов в осенний период. В то же время оз. Дуро-Нуур за счет испарения сокращает расход р. Ульдза – также порядка $0,82 \text{ м}^3/\text{с}$ (11 %), аналогично участку 3, полученных по оценке измеренных расходов до впадения реки ($6,98 \text{ м}^3/\text{с}$) в озеро и после ($6,16 \text{ м}^3/\text{с}$).

Участок 5 (У5) располагается от отвода р. Ульдза в р. Тэлийн-Гол до впадения в Торейские озера на расстоянии около 22 км по руслу реки. На участке находятся устья рек Ульдза и Ималка. Река Ималка впадает в северную часть оз. Барун-Торей и имеет незначительный расход порядка 3 % от стока р. Ульдза, полученных по оценке измерений расходов на р. Ималка и р. Ульдза. При повышенной водности в северо-западную часть оз. Барун-Торей вблизи северной протоки между озерами начинает поступать вода с протоки Борохолой.

Важным дополнением к анализу стока р. Ульдза явились полученные на гидропосте в с. Соловьевск данные ее расходов за последние 9 лет, которые были оцифрованы и использованы в качестве вспомогательной информации при дальнейшем моделировании стока реки.

Гидрометрические характеристики бассейна р. Ульдза

Исследование р. Ульдза проводились с целью выявления гидрометрических характеристик на морфостворе: скорость течения воды, площадь сечения, уклон вдоль русла, расстояние до выхода на пойму и др. Скорость течения определялась в нескольких точках и на различных глубинах (1–4 точки измерения глубины) с использованием гидрометрической вертушки с преобразователем ГР-21М. Геодезические замеры (определение разности и перепада высот) производились с использованием нивелира VEGA L24 с рейкой. Помимо стандартных

обязательных приборов для измерений, было использовано современное вспомогательное оборудование (квадрокоптер, эхолот, бесконтактный термометр, GPS приемник и др.).

Расчеты расходов проводились по сечению морфостворов, примеры которых показаны на рис. 2 для пунктов измерения до отвода р. Ульдза в р. Тэлийн-Гол и после него на участке измерения У4. Данные сведения являются необходимыми для дальнейшего моделирования стока р. Ульдза.

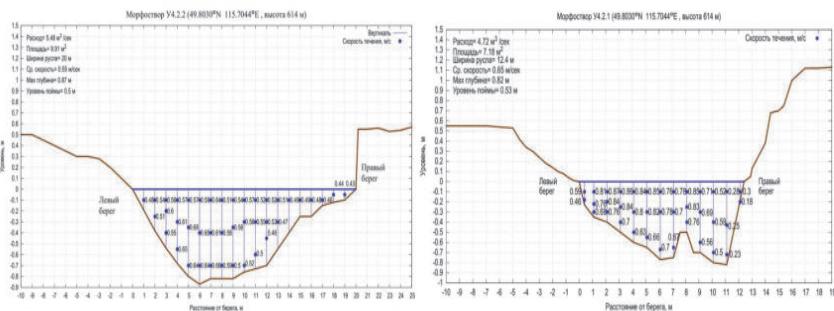


Рис. 2. Сечения морфостворов р. Ульдза до и после отвода в р. Тэлийн-Гол

В период экспедиции, в результате произведенных измерений гидрологических характеристик р. Ульдза, от места проектируемой плотины до устья, ее притоков и отвода на территории Монголии, впервые были получены сведения о расходах р. Ульдза, представленные в табл. 1.

Таблица 1
Измеренные расходы р. Ульдза, ее притоков и отвода в период экспедиции на территории Монголии от проектируемого водохранилища до устья

№	Расстояние от устья реки, км	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.	Высота, м	Ширина реки, м	Глубина реки, м	Скорость, м/с	Площадь сечения, м ²	Расход, м ³ /с
1	327	49,4002	113,668	760	19,45	0,9	0,46	12,39	5,74
2	327	49,4002	113,668	760	5,5	0,35	0,22	1,3	0,27
3	327	49,4002	113,668	760	6,2	0,23	0,15	0,93	0,14
4	295	49,5028	114,158	721,9	17,1	0,71	0,68	9,04	6,17
5	135	49,504	114,674	684	17,1	0,85	0,69	10,6	6,86
6	96	49,6966	115,162	648	22	0,68	0,5	12,06	6,01
7	96	49,6851	115,444	629	16,5	1,35	0,56	12,56	6,98
8	89	49,7096	115,509	627	22,5	1	0,48	12,81	5,8
9	53	49,803	115,704	616	20	0,82	0,55	9,91	5,48
10	53	49,803	115,704	616	12,4	0,82	0,66	7,18	4,72
11	3	49,8054	115,713	615	7,8	0,3	0,48	1,48	0,71
12	0,7	49,8054	115,713	615	11,2	0,37	0,25	2,75	0,68
13	65	49,5749	115,609	562	9	0,48	0,3	2,38	0,72

Расчеты расходов проводились по сечению морфоствора, сведения о которых являются необходимыми для дальнейшего моделирования стока р. Ульдза при возможном завершении строительства плотины и создании водохранилища на р. Ульдза.

Максимальный расход р. Ульдза, замеренный в месте впадения реки в оз. Дуро-Нуур, составил $6,98 \text{ м}^3/\text{с}$, минимальный расход составил $4,72 \text{ м}^3/\text{с}$, замеренный после отвода в р. Тэлийн-Гол, что подтверждает уменьшение стока ниже по течению реки после отвода на $2,26 \text{ м}^3/\text{с}$. Также был замерен небольшой приток р. Ульдза в двух сечениях морфостворов, его расход составил порядка $0,2 \text{ м}^3/\text{с}$, что является незначительной долей (3 %) от расхода р. Ульдза. Измерение расхода р. Тэлийн-Гол показало, что выпрямление русла сохраняет приток в оз. Хух-Нуур за счет отсутствия потери воды при искривлении русла (влияния расстояния, испарения и выхода части воды на пологую пойму).

Результаты измеренных характеристик морфостворов позволяют в дальнейшем использовать их с применением формулы Шези (вычисление скорости течения) [2] для моделирования расходов вплоть до выхода на пойму и исчезновения расхода. У большинства морфостворов выход на пойму начинается с расходов $20\text{--}30 \text{ м}^3/\text{с}$. Особенно это важно при низкой водности р. Ульдза для дальнейшей оценки наполнения уровня Торейских озер.

В период проведения экспедиционных работ при изучении расхода р. Ульдза было исследовано искусственное углубление русла (помимо естественного, находящегося на расстоянии около 100 м по руслу от искусственного и работающего при высоком уровне воды) в виде водоотвода в р. Тэлийн-Гол (ранее заченного на космических снимках на расстоянии примерно 10 км от границы РФ). Данный отвод может оказать существенное влияние на гидрологический режим Торейских озер, особенно в периоды малой и средней водности, поэтому в ходе экспедиции были проведены измерения р. Ульдза до и после отвода (рис. 3, а, б) и р. Тэлийн-Гол вблизи ее истока (рис. 3, в) и устья (рис. 3, г). При предварительном обследовании р. Тэлийн-Гол было отмечено, что осенью прошлого года вода выходила на пойму при расходе около $25 \text{ м}^3/\text{с}$ и разливалась по степи.

Расход воды р. Ульдза после отвода в р. Тэлийн-Гол уменьшился на $0,76 \text{ м}^3/\text{с}$ в р. Ульдза в условиях средней водности, к которому можно отнести 2022 г. (согласно измеренным и многолетним данным). В условиях высокой водности, например 1999 г., эта величина может возрасти до 30 %, а при низкой (которая на р. Ульдза продолжалась в течение 20 лет, начиная с 2001 г.) – приближается к нулевым показателям (величина отвода также будет низкой, но не нулевой).

Заключение

В ходе экспедиционных работ в июне 2022 г. были исследованы бассейны р. Ульдза и Торейских озер, уточнены гидрологические данные р. Ульдза и батиметрические характеристики Торейских озер. Собранная информация необходима для дальнейшего моделирования гидрологических режимов Торейских озер.



Рис. 3. Измерение расхода воды р. Ульдза в период экспедиции 2 июня 2022 г.:
а) р. Ульдза перед отводом; б) р. Ульдза после отвода; в) р. Тэлийн-Гол в 3 км от истока;
г) устье р. Тэлийн-Гол в 3 км от впадения в оз. Хух-Нуур

По итогам обследования отвода и его характеристик выявлено, что часть стока р. Ульдза уходит в р. Тэлийн-Гол на монгольской территории со спрямлением и углублением русла реки Тэлийн-Гол, что создало прямолинейное движение воды вниз по течению и более стремительное наполнение оз. Хух-Нуур. Тем самым появляются условия дополнительного сокращения притока воды в Торейские озера.

Обследование русла р. Ульдза с полученными гидрологическими характеристиками позволяет проводить более точные расчеты по моделированию рисков отсутствия водности на Торейских озерах с учетом функционирования проектируемого на ней водохранилища и отвода части стока в р. Тэлийн-Гол.

Список литературы

1. Ежегодные данные о режиме ресурсах поверхностных вод суши. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1986. Ч. 1: Реки и каналы. Ч.: 2. Озера и водохранилища. Т. I . Вып. 20. Бассейны Шилки, Аргуни, Амазара.
2. Железняков Г.В., Неговская Т.А., Овчаров Е.Е. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока. М: Колос, 1984. 205 с.
3. Кашицкая М.А. Гидрологический режим бессточных озер в степной зоне Забайкалья (на примере Торейских озер): дис. канд. геогр. наук : 25.00.27. М., 2022. 126 с.

4. Кашицкая М.А., Болгов М.В. Бессточные Торейские озера: можно ли дать прогноз изменений гидрологического режима? // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 95–98.
5. Кашицкая М.А., Болгов М.В. Оценка влияния строительства гидротехнического сооружения на гидрологический режим трансграничной реки Ульзы // Сборник матер. Всеросс. научно-практ. конф. с междунар. участием «Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана» (20–25 сентября 2021 г., сочи) – Ростов-на-Дону: Российский инф.-аналитич. и научно-исслед. водохозяйственный центр, 2021. С. 179–185.
6. Кирилюк В.Е. [и др.] Биосферный заповедник «Даурский». Чита: Экспресс-издательство, 2009. 104 с.
7. Кирилюк В.Е. [и др.] Предварительная оценка влияния на экосистему Торейских озер плодоносного, строящейся на трансграничной реке Ульзы в Монголии // Сб. трудов конференции «Трансграничные водные объекты: использование, управление, охрана». Новочеркасск. 2021. С. 185–191.
8. Кирилюк О.К., Ткачук Т.Е. Даурия как экологический регион // Проблема адаптации к изменению климата в бассейне рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. Чита: Экспресс-издательство, 2012. С. 7–13.
9. Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. Т. 18. Дальний Восток. Вып. 1. 790 с.
10. Улз голын урсцыг нэмэгдүүлэх "Онон-Улз". URL: www.tender.gov.mn/en/invitation/detail/1570643029346 (дата обращения: 01.10.2022 г.).
11. Ulz River Basin Integrated Water Resources Management Plan (MON/12/301 project), Ulaanbaatar, 2013. 99 р.

УДК 551.510.42

Мониторинг паводковой обстановки с использованием спутниковых данных на примере наводнения на реке Амур в 2021 году

Ю. А. Амельченко (ovp@dvrspod.ru), Л. С. Крамарева, В. В. Суханова,
Ю. А. Шамилова, З. Н. Лотарева, Л. А. Корнева

Дальневосточный центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Хабаровск

Аннотация. Рассмотрены возможности спутникового мониторинга паводковой обстановки, проводимого в Дальневосточном центре НИЦ «Планета», на примере наводнения на р. Амур в 2021 г. Описаны причины формирования волн наводнения, ключевые моменты и особенности развития паводковой ситуации. Обозначено, что комплексный анализ спутниковой информации, включающий построение векторов разливов и тематических карт паводковой обстановки, карт оригинальной классификации облачности и разложения на зоны осадков различной интенсивности, имеет важное значение для прогнозирования уровней воды, принятия решений по введению мер по подготовке к паводку и последующей оценке ущерба от наводнения. Особенно актуально это в условиях Дальневосточного федерального округа, где сеть наземных наблюдений очень разрежена.

Ключевые слова: спутниковый мониторинг наводнения, паводок категории ОЯ, разлив реки Амур в 2021 г., классификация разлива, вектора затопленных зон, анализ паводковой обстановки.

Введение

Река Амур является крупнейшей трансграничной водной артерией России, площадь ее бассейна занимает десятое место среди рек мира. До 70 % стока реки формируется за счет выпадающих осадков. С 2009 г. в бассейне р. Амур наблюдается режим повышенной водности, сопровождающийся серией разливов реки

и ее крупных и мелких притоков. В 2021 г. на территории Амурской области, Еврейской автономной области и Хабаровского края наблюдалась чрезвычайная ситуация, связанная с продолжительным и обширным затоплением в верхнем, среднем и нижнем течениях реки, достижением, а местами даже значительным превышением, отметок неблагоприятного и опасного явлений (НЯ и ОЯ).

Данные дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) предоставляет возможность получать информацию о состоянии речной сети, позволяет осуществлять наблюдение за обширными участками местности и существенно сокращает расходы на такой мониторинг.

В связи с тем, что сеть гидрологических постов в бассейне реки Амур развита слабо, а информация по территории сопредельных государств отсутствует, данных наземных наблюдений в период высокой воды недостаточно. В такой ситуации своевременное получение оперативных данных ДЗЗ играет ключевую роль в комплексной оценке развития паводка и является залогом принятия эффективных управленческих решений по принятию дополнительных мер при подготовке к пропуску паводковых вод. На рис. 1 представлен пример берегоукрепительных работ в городской черте Хабаровска, проведенный в 2021 г. основываясь на анализе спутниковых данных за 2013 г.

Характерные особенности паводка 2021 г.

Основной особенностью паводка 2021 г. является необычайно раннее его начало. За весь период наблюдений Амур в мае – июне разлился впервые, до этого все наводнения на реке и ее притоках приходились на июль – август вследствие муссонного климата и выхода тайфунов и циклонов с акватории Тихого океана.

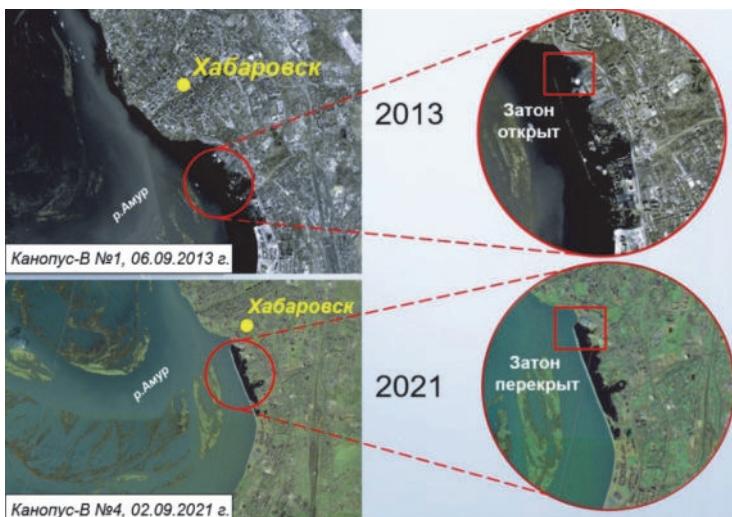


Рис. 1. Пример принятия мер по подготовке к паводку

Сам паводок на Амуре 2021 г. можно условно разделить на две основные волны. Первая была вызвана ранними аномально сильными майскими дождями в верховьях реки на территории Амурской области, Забайкальского края и КНР. В сочетании с недостаточно быстрым оттаиванием почвы это обеспечило формирование паводка с достижением категории ОЯ, а местами и с превышением исторических максимумов уровней воды на Верхнем Амуре.

Июнь также отметил необычайно обильными осадками. На территории Амурской области их количество превысило норму в среднем на 47 %, а местами, например, у г. Благовещенска, был превышен исторический максимум уровня воды: 26 июня при прохождении гребня паводка уровень составил 860 см при уровне ОЯ 800 см.

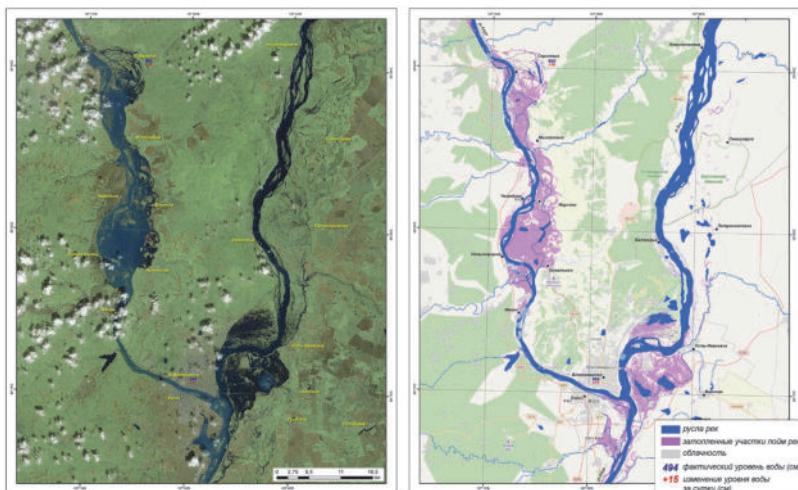


Рис. 2. Паводковая обстановка у г. Благовещенск на 27.06.2021 по данным KA Sentinel-2A/MSI

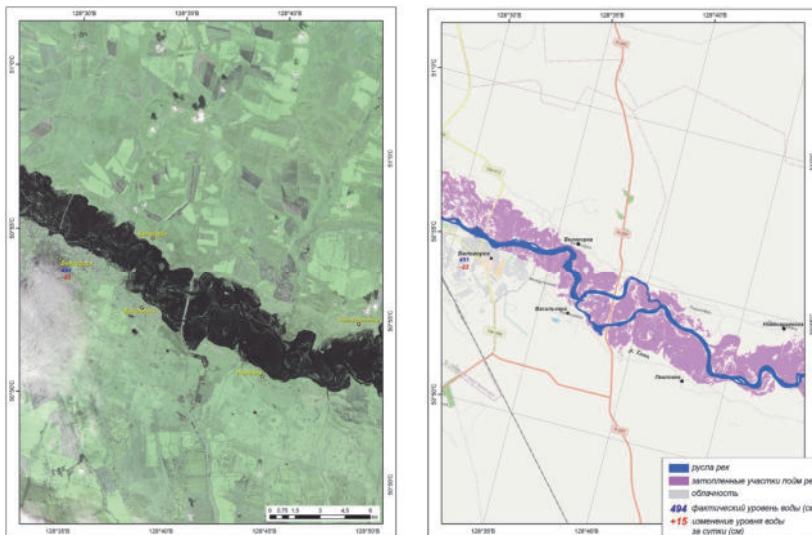
Формирование второй волны паводка обеспечили прошедшие в июле и августе над территорией Забайкальского края и Амурской области мощные циклоны, вызвавшие продолжительные ливневые дожди, отмечавшиеся над всем водосборным бассейном р. Амур.

Так, например, в Амурской области осадки за июль в среднем превысили норму на 32 %, за август – на 45 %. 13–16 июля на ст. Усть-Ниман прошли сильные и очень сильные дожди, за три дня выпало до 130 мм осадков, что составило 80 % от месячной нормы. На р. Бурея отмечен интенсивный подъем уровней воды на 223–283 см за сутки.

За 10 дней августа были зафиксированы 15 случаев выпадения осадков категории опасного метеорологического явления. По фактическим данным сумма выпавших осадков составила от 37 мм (около климатической нормы месяца) до

181 мм (385 % от климатической нормы декады). На р. Томь у г. Белогорска 6 августа был зафиксирован новый исторический максимум уровня воды, который составил 523 см, что превышает отметку ОЯ на 123 см.

На Среднем и Нижнем Амуре на участке с. Ленинское – с. Тахта за счет смещения волн паводка с Верхнего Амура и крупных притоков реки долго сохранялось высокое стояние воды с уровнями категории неблагоприятного и опасного явлений. Период категории НЯ на Нижнем Амуре отмечался у с. Бого-родское до 6 октября 2021 г. и составил 55 дней.



*Рис. 3. Паводковая обстановка у г. Белогорск на 11.08.2021
по данным КА Канопус-В № 4/МСС*

Еще одной особенностью паводка 2021 г. можно назвать существенное превышение уровней опасного явления (ОЯ) на Верхнем Амуре, что не характерно для других периодов повышенной водности и в целом для реки: обычно максимальное развитие паводка и наиболее катастрофические уровни наблюдаются в нижнем течении Амура.

Спутниковый мониторинг паводка 2021 г.

В течение всего периода прохождения паводковых вод специалисты Дальневосточного центра НИЦ «Планета» (ДЦ НИЦ «Планета») ежесуточно осуществляли мониторинг паводковой ситуации на всем протяжении реки Амур и ее притоках по трем уровням обработки: региональный – по данным космических аппаратов (КА) TERRA и AQUA, локальный – по данным высокого разрешения КА серий Landsat, Метеор-М, Канопус-В) и уровень, предусматривающий тематическую обработку данных первых двух уровней и выделение зон разливов

рек, облачности и осадков. Классификация осуществлялась с помощью методики, разработанной в ДЦ НИЦ «Планета». Также были задействованы радиолокационные данные, позволяющие осуществлять мониторинг независимо от присутствия над районом интереса облачности. Совмещение выделенных по спутниковой информации затопленных участков пойм рек и пойменных озер с топографической картой демонстрирует масштабы наводнения и позволяет отследить смещение гребней паводка не только по уровням воды. Такими совмещенными изображениями были обеспечены все заинтересованные потребители: управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Дальневосточного региона, Правительство Хабаровского края, структуры МЧС, подразделения МО РФ, администрации субъектов ДФО.

Классифицированные в большом количестве карты зон затоплений оперативно интегрировались в ведомственную геоинформационную систему (ГИС) «Метео ДВ» [1], разработанную в кооперации с ФГБУ «Дальневосточное УГМС» и ДВНИГМИ. В ГИС предусмотрены инструменты отображения на картографической основе выделенных зон затоплений с возможностью их сопоставления с текущими и прогнозируемыми уровнями воды на гидрологических постах. Накопленная за весь период повышенной водности база зон затоплений позволяет специалистам на любом этапе развития паводка оценить вероятные зоны затопления поймы реки при различных прогнозируемых значениях уровней воды.

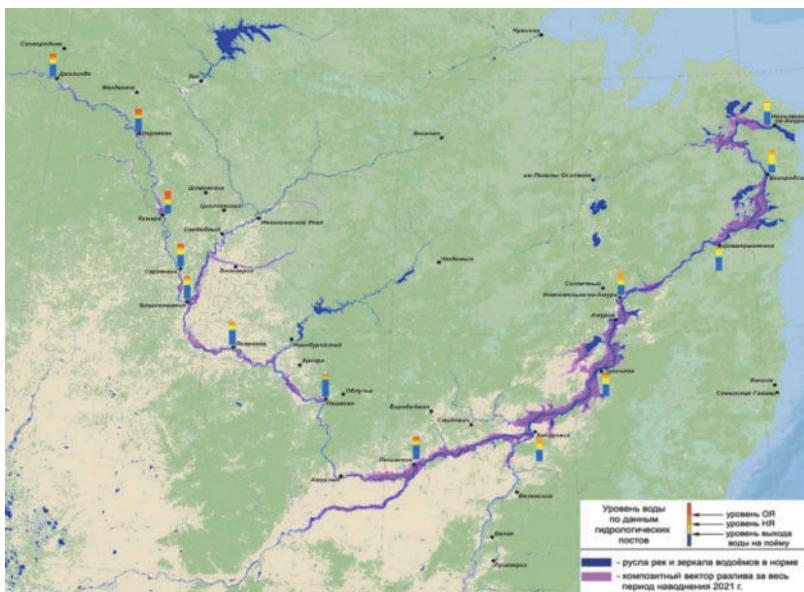


Рис. 4. Композитная карта-схема разлива р. Амур и ее притоков в 2021 г.

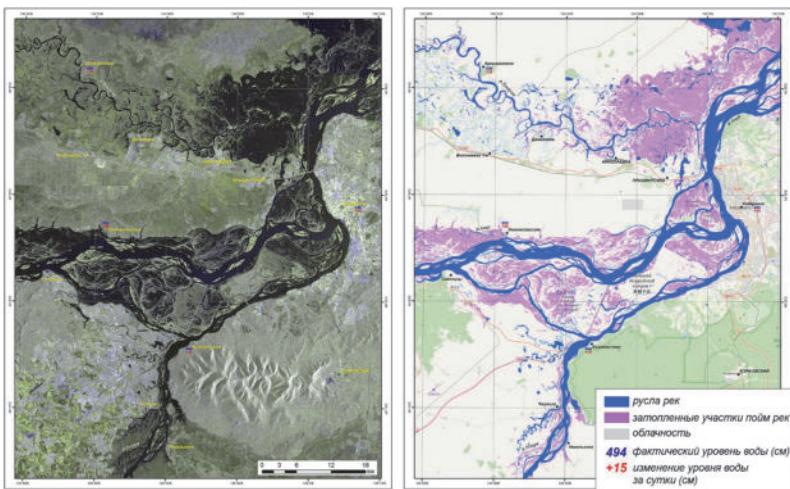


Рис. 5. Паводковая обстановка у г. Хабаровск 11.08.2021
по радарным данным КА Sentinel-1B/SAR

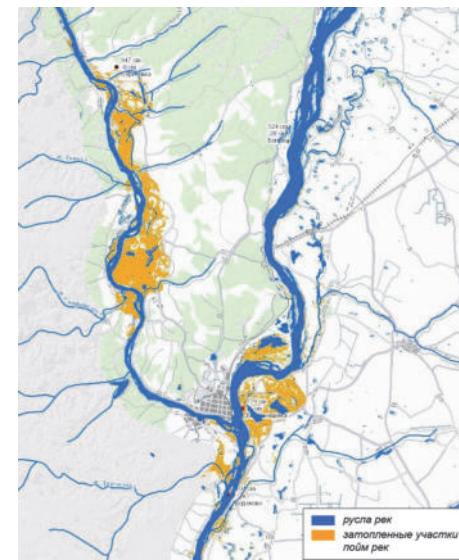


Рис. 6. Пример отображения информационных слоев в ГИС «Метео ДВ»

Практика работы в период паводка показала, что наиболее успешное прогнозирование кратковременных, но достаточно интенсивных дождевых подъемов воды возможно лишь при детальном и оперативном анализе спутниковых изображений облачности и продуктов их обработки. Еще в конце июня в пик

дождевого паводка было отмечено, что из-за редкой наблюдательной сети большое количество выпавших осадков не было зафиксировано, однако внесло существенный вклад в сток и формирование дождевых паводков. Для оперативной оценки и учета подобных факторов в ДЦ НИЦ «Планета» разработана и внедрена в оперативную работу региональных гидрометцентров автоматическая система визуализации данных геостационарного КА Himawari-8. Высокая частота получения данных и оперативный доступ к информации позволяют максимально эффективно использовать ресурс для решения оперативно-прогностических задач, в том числе, разложение облачного покрова на зоны осадков соответствующей интенсивности. Система позволяет автоматически обновлять информационные продукты на экране каждые 10 мин, получать широкий перечень продуктов по району интереса, совмещать разные виды продуктов в двух окнах интерфейса, просматривать данные в режиме анимации, накладывать данные прогностических моделей.

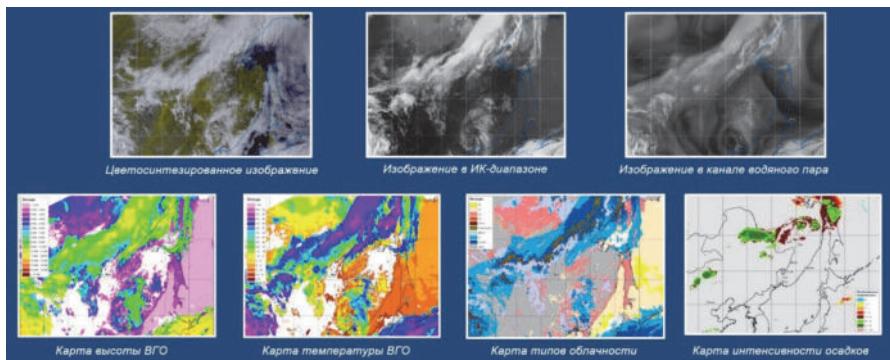


Рис. 7. Примеры информационной продукции в интерфейсе визуализации данных Himawari-8

Заключение

В настоящее время увеличивается количество космических аппаратов и улучшается качество спутниковых изображений, интенсивно разрабатываются и совершенствуются технологии обработки и анализа данных. Поэтому можно с уверенностью сказать, что в дальнейшем роль спутниковой информации в мониторинге и прогнозировании ЧС (в том числе и наводнений) будет только возрастать.

Результаты комплексного анализа спутниковой информации, включающей в себя карты оригинальной классификации облачности и разложения на зоны осадков различной интенсивности, вектора разливов и тематические карты паводковой обстановки, сыграли важную роль в корректировке прогноза уровней воды на всем протяжении реки Амур.

Список литературы

- ГИС «Метео-ДВ». URL: <https://meteo-dv.ru/gis.html> (дата обращения: 18.10.2022).

УДК 556.5.04

Статистическая обработка гидрологических данных с помощью инструментов языка программирования Python

Ф. М. Андреев (fmandreev@yandex.ru), Е. Н. Сутырина (ensut78@gmail.com)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Рассмотрен один из способов статистической обработки гидрологической информации средствами языка программирования Python с помощью библиотеки Pandas DataFrame. Рассчитаны основные статистические параметры на примере данных архива наблюдения за среднесуточными уровнями оз. Байкал – пос. Нижнеангарск и уровнем, и расходами воды Верхней Ангары – с. Верхняя Заимка за 2008–2019 гг. Графическая визуализация среднесуточного хода уровней оз. Байкал и расходов воды Верхней Ангары за 2008–2019 гг. выполнена с помощью библиотеки Matplotlib.

Ключевые слова: гидрологическая информация, статистический анализ, Python, Pandas DataFrame, Matplotlib.

Введение

Современная тенденция на развитие методов исследования с применением данных дистанционного зондирования Земли заставляет искать новые решения в задачах обработки большого количества информации. Одним из вариантов решения проблемы быстрого и комплексного анализа большого объема данных, может быть использование вычислительных средств современных языков программирования. В качестве рабочей среды в данный работе выбран язык программирования общего назначения Python [1].

Python – комплексное программное обеспечение с широким спектром возможностей. Выбор языка Python в качестве рабочей среды обусловлен рядом преимуществ – простым и доступным синтаксисом языка, его надежностью и широкими возможностями. Статистический анализ большого количества гидрологической информации средствами современных электронных таблиц, зачастую требует большего количества времени и точности. При необходимости постоянной обработки и анализа входящих данных, наиболее актуален вопрос автоматизации расчета необходимых величин и формирования отчетного материала.

Цель работы – написание кода программы на языке Python, способной выполнять расчет основных статистических параметров интересующего ряда наблюдений и среднегодовых величин. Для выполнения поставленной цели были выбраны библиотеки Pandas DataFrame и Matplotlib. Поиск путей автоматизации процессов обработки большого количества потоковых и архивных данных обуславливает актуальность работы.

Исходные данные и методы

В качестве исходного материала использованы данные архива автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов – АИС ГМВО [2] об уровненном режиме оз. Байкал – пос. Нижнеангарск и уровней, и расходов воды В. Ангары – с. Верхняя Зaimка за 2008–2020 гг. Данные занесены в таблицу, сформированную в файле формата .xlsx. Исходная таблица содержит столбцы «DATES» – дата наблюдения; «HB» – уровень оз. Байкал относительно нуля поста, м; «QA» – расход воды В. Ангары, м³/с; «HA» – уровень воды В. Ангары, м; «NUM» – порядковый номер наблюдения.

Для работы с табличным материалом (открытии, записи и редактировании файла .xlsx) в среде Python, применялась библиотека Pandas DataFrame, непосредственно написание кода и его компиляция выполнялась в это интерактивной вычислительной среде Jupyter Notebook [3] (рис.1).

```
1. import pandas as pd
2. import matplotlib.pyplot as plt
3. file = 'statist.xlsx'
4. xl = pd.ExcelFile(file)
5. print('\033[1m"Список активных листов: "\033[0m', (xl.sheet_names))
6. df1 = xl.parse('sheet1')
7. print(round(df1, 2))
```

Рис. 1. Фрагмент кода: импорт библиотек и исходного файла .xlsx

Здесь в переменную 'file' загружается исходный рабочий .xlsx файл, и импорт активного листа электронной таблицы по его имени df1. Результат выполнения данного фрагмента кода представлен на рис. 2. Таблица значений содержит в себе 4383 строки.

DATES	HB	QA	HA	NUM
01.01.2008	208	105	180	1
02.01.2008	207	104	180	2
03.01.2008	207	103	180	3
04.01.2008	205	102	179	4
05.01.2008	205	101	179	5
06.01.2008	204	100	178	6
07.01.2008	204	99,2	178	7
08.01.2008	204	98,4	178	8
09.01.2008	204	97,6	178	9
10.01.2008	203	96,8	178	10
11.01.2008	201	96,0	178	11
12.01.2008	198	95,2	178	12
13.01.2008	197	94,4	178	13
14.01.2008	196	93,6	178	14
15.01.2008	193	92,8	178	15

	DATES	HBBS	HB	QA	HA	NUM
0	2008-01-01	455.35	208	105.0	180	1
1	2008-01-02	455.34	207	104.0	180	2
2	2008-01-03	455.34	207	103.0	180	3
3	2008-01-04	455.32	205	102.0	179	4
4	2008-01-05	455.32	205	101.0	179	5
...
4378	2019-12-27	455.40	213	99.0	158	4379
4379	2019-12-28	455.40	213	98.0	157	4380
4380	2019-12-29	455.39	212	97.0	156	4381
4381	2019-12-30	455.38	211	96.0	155	4382
4382	2019-12-31	455.37	210	95.0	155	4383

Рис. 2. Представление исходных данных в MS Excel (слева) и среде Python, с помощью библиотеки Pandas DataFrame (справа)

Для пересчета среднесуточных уровней воды оз. Байкал – пос. Нижнеангарск (отметка нуля поста 453,27) в Балтийскую систему высот (БС) выполнен с помощью функции `.insert`, добавляющей новый столбец с указанным номером и производит расчет по указанной формуле (рис. 3). Аналогичным образом возможно проводить расчеты между отдельными столбцами таблицы.

1. `df1.insert(1, "HBBS", round((df1['HB']) / 100) + 453.27, 2))`
2. `print(df1, "\n")`

Рис.3. Фрагмент кода: интеграция нового столбца в таблицу

Рассчитаны средние значения уровней оз. Байкал и уровней, и расходов В. Ангары за многолетний период. Расчет среднего `.mean()`, стандартного отклонения `.std()`, коэффициентов вариации `.mean()` и корреляции `.corr()` выполнен на примере данных расходов и уровней воды для В. Ангара – с. Верхняя Заимка (рис. 4).

1. `meanQA = df1['QA'].mean()`
2. `print("\033[1m"Среднее значение QA = "\033[0m", (round(meanQA, 2)))`
3. `correl=df1['QA'].corr(df1['HA'])`
4. `print("\033[1m"Коэффициент корреляции Q и H – В. Ангара, с. В. Заимка = ', round(correl, 2), '\n")`
5. `sd = df1['QA'].std()`
6. `print("\033[1m"Стандартное отклонение QA = "\033[0m", round(sd, 2), '\n')`

Рис. 4. Фрагмент кода: расчет среднего, коэффициента корреляции и стандартного отклонения

Результаты

В результате проведенной работы, получен код программы, способной проводить статистическую обработку исходных данных за интересующий период наблюдений, представленный в виде электронной таблицы `.xlsx`, проводить расчет среднегодовых значений и генерировать отчетный графический материал по интересующему параметру.

С помощью модуля `Pyplot` построены гидрограф расхода воды, график уровня воды В. Ангары – с. Верхняя Заимка, 2008–2019 гг. и график уровня воды оз. Байкал – пос. Нижнеангарск, 2008–2019 гг. (рис. 5).

На рис. 6 представлен фрагмент кода для создания графического материала на примере гидрографа расхода воды В. Ангары. При необходимости, графики, как и другие выходные данные можно автоматически сохранять в указанной директории, либо непосредственно в исходном файле `.xlsx`.

Рассчитаны среднегодовые – `.mean()`, максимальные – `.max()` и минимальные – `.min()` значения уровня воды оз. Байкал и уровня, и расхода воды В. Ангары. Фрагмент кода представлен на рис. 7. Метод `.set_index` используется для установки списка (столбца) значений в качестве индекса данных. В данном

случае, в качестве значения индекса установлены выбраны столбцы уровней и расходов воды. Функция `.resample` предназначена для работы с временными рядами, с данными в формате даты – DD.MM.YYYY.

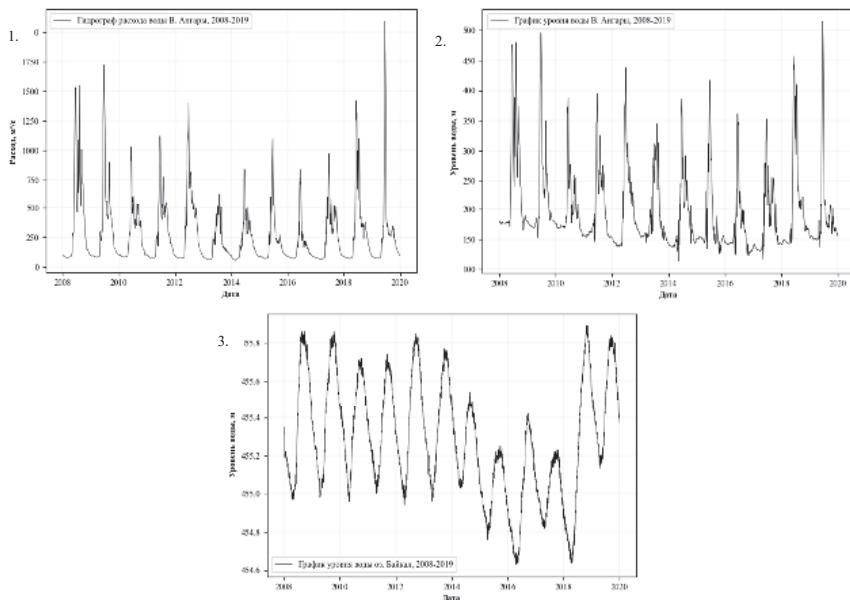


Рис. 5. Гидрограф расхода воды В. Ангары – с. Верхняя Заимка (1);
график уровня воды В. Ангары – с. Верхняя Заимка (2);
график уровня воды оз. Байкал – пос. Нижнеангарск (3), 2008–2019 гг.

```

1. plt.figure(figsize=(7,5))
2. plt.rc('font', **{'family': 'Times New Roman'})
3. plt.plot(df1['DATES'], df1['QA'], color='black', linewidth=0.5)
4. plt.tick_params(axis="both", which='major', labelsize=9)
5. plt.xlabel("Дата", fontsize=9, fontweight="bold")
6. plt.ylabel("Расход, м³/с", fontsize=9, fontweight="bold")
7. plt.grid((True), which='major', color='black', linewidth= 0.05)
8. plt.legend(['Гидрограф расхода воды В. Ангары, 2008–2019'], fontsize=9)
```

Рис. 6. Фрагмент кода: создание графического материала на примере гидрографа расхода В. Ангары – с. Верхняя Заимка за 2008–2019 гг.

```

1. print("\033[1m"Средние значения по годам"\033[0m", "\n")
2. meanval_year = df1.set_index('DATES').resample('Y')[['HA','QA', 'HB']].mean()
3. print(round(meanval_year, 2), "\n")
```

Рис. 7. Фрагмент кода: расчет среднегодовых значений уровней на примере оз. Байкал,
уровней и расхода В. Ангары

Аналогичным способом могут быть рассчитаны статистические параметры за каждый год или месяц. Рассчитанные средствами библиотеки Pandas DataFrame среднегодовые, максимальные и минимальные значения выводятся, в результате выполнения кода, в табличном виде (рис. 8).

Среднегодовые значения			Максимальные годовые значения			Минимальные годовые значения					
DATES	HA	QA	DATES	HA	QA	DATES	HA	QA			
2008-12-31	237.36	403.50	213.52	2008-12-31	480	1550.0	259	2008-12-31	165	79.9	170
2009-12-31	219.08	342.05	215.69	2009-12-31	496	1720.0	259	2009-12-31	152	83.1	171
2010-12-31	197.44	267.80	212.76	2010-12-31	388	1030.0	245	2010-12-31	155	83.4	169
2011-12-31	201.41	292.22	210.01	2011-12-31	395	1120.0	247	2011-12-31	145	75.5	173
2012-12-31	200.73	340.10	213.67	2012-12-31	438	1400.0	258	2012-12-31	138	74.1	167
2013-12-31	189.75	190.69	211.33	2013-12-31	345	631.0	250	2013-12-31	143	61.9	169
2014-12-31	183.81	214.37	200.30	2014-12-31	386	842.0	227	2014-12-31	114	58.6	176
2015-12-31	179.40	220.99	175.65	2015-12-31	417	1100.0	198	2015-12-31	126	69.9	149
2016-12-31	166.89	171.29	172.31	2016-12-31	361	841.0	215	2016-12-31	123	71.9	136
2017-12-31	178.52	251.10	175.88	2017-12-31	353	974.0	196	2017-12-31	117	65.9	155
2018-12-31	206.70	323.31	194.36	2018-12-31	457	1420.0	262	2018-12-31	141	70.6	137
2019-12-31	190.64	277.94	222.56	2019-12-31	515	2090.0	257	2019-12-31	136	73.7	186

Рис. 8. Результат выполнения кода – рассчитанные среднегодовые, максимальные и минимальные значения уровней и расходов воды В. Ангары – с. В. Заимка и уровней оз. Байкал – пос. Нижнеангарск

Выводы

При наличии большого временного ряда наблюдений за гидрологическими величинами, для выполнения статистического анализа данных и генерации графического материала, более рациональным способом обработки данных будет привлечение средств и инструментов языка программирования Python.

В результате выполненной работы получены основные статистические параметры, среднегодовые, максимальные и минимальные значения уровней и расходов выбранных объектов исследования с помощью модуля Pandas DataFrame, графики уровней и гидрографы расхода с помощью модуля Matplotlib.

Приобретены навыки обработки гидрологических рядов данных при наличии большого количества дней наблюдений.

Наработанный в ходе выполнения данной работы материал будет использован при написании работы на тему применения инструментов и средств языка программирования Python в задачах анализа многоканальных спутниковых изображений.

Список литературы

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 25.10.2022)
2. Python. URL: <https://www.python.org/> (дата обращения: 01.11.2022)
3. Project Jupyter. URL: <https://jupyter.org/> (дата обращения: 01.11.2022)

УДК 528.88

Проверка точности водных разностных индексов по данным ДЗЗ для оценки береговой линии оз. Байкал

Е. В. Болданова (boldanova@mail.ru)

Байкальский государственный университет, Иркутск

Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

Аннотация. В исследовании проведена проверка целого ряда индексов для идентификации водоемов на снимках Sentinel-2, Landsat-8 и 5. Оценка точности индексов осуществлялась по показателю общей точности и коэффициенту каппа Коэна (оценивающему степень согласия между опорной тематической картой и результатом классификации с помощью индекса) для разных участков береговой линии: ровный берег, дельта реки (р. Селенга, р. Верхняя Ангара), острова (о. Ярки). В качестве опорной тематической карты использовались контуры, построенные по высокоточным снимкам MAXAR за определенную дату. Для калибровки подбирались космоснимки на ту же дату или близкую к ней. Для Sentinel-2 с задачей классификации вода/суша на разных участках лучше всего справлялся индекс NDWI Green NIR > 0. Для Landsat-8 и 5 предпочтительней оказался индекс MNDWI Green SWIR > 0. Полученный для Landsat-8 результат можно распространить на запущенный год назад Landsat-9 (используется датчик OLI), а результат для Landsat-5 можно интерполировать для Landsat-4 (один и тот же датчик TM). Полученные результаты можно использовать для оценки динамики изменений берегов оз. Байкал за период с 1982 по 2022 г.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, оз. Байкал, Sentinel-2, Landsat, каппа Коэна.

Космоснимки Landsat, Sentinel-2 предоставляют прекрасную возможность для оценки динамики береговой линии оз. Байкал. Охватываемый период составляет с 1982 по 2022 г. За это время происходили смены многоводных и маловодных периодов, накопились воздействия эоловых, сгонно-нагонных и других процессов. Регулярные снимки из космоса позволяют оценить произошедшие изменения. Особенно это актуально для мелководных участков оз. Байкал, привлекательных для местных жителей и приезжающих туристов.

Для быстрого получения информации по космоснимкам, по водоемам, в частности, широко используются различные индексы [1; 2]. Была поставлена задача определить наиболее подходящие индексы для определения границ вода/суша. Точность индексов по космоснимкам Sentinel-2, Landsat-5, 8 проводилась по снимкам MAXAR (Digital Globe) с пространственным разрешением 1 м (получены на основе данных Google [4]). Оценка достоверности результатов классификации проводилась методом, основанным на построении матрицы ошибок классификации [3], представляющей собой распределение пикселей, верно или неверно определившихся при классификации воды и сушки. Суша определена оконтуриванием вручную на основе снимков Maxar, вода определена как разность всей выборки и области сушки. Проверка точности индексов проводилась с помощью показателя общей точности классификации и коэффициента каппа Коэна (при значении этого показателя более 0,81 оцениваемый индекс можно считать подходящим для классификации).

Проверка снимков Sentinel-2 на протяженном участке ровной береговой линии по летним снимкам представлена в табл. 1.

*Таблица 1
Проверка точности индексов Sentinel-2 на ровном береговом участке*

Индекс	Общая точность, %	Каппа Коэна
1. WRI=(Green+Red)/(NIR+SWIR1)>1	90,7173	0,6867
2. NDWI NIR SWIR =(NIR-SWIR1)/(NIR+SWIR2)>0	72,4014	0,3633
3. NDWI Green NIR =(Green-NIR)/(Green+NIR)>0	94,8635	0,8956
4. NDVI = (NIR-Red)/(NIR+Red) ∈ [-0,1;0,2]	28,0775	-0,1842
5. MNDWI Green SWIR =(Green-SWIR1)/(Green+SWIR1)>0	88,5823	0,7733
6. AWEI =4*(Green-SWIR1) – (0,25Green + 2,75SWIR2) >0	85,3211	0,7121

Почти все индексы хорошо справились с задачей определения границы вода/суша, за исключением NDVI, поэтому данный индекс из дальнейшего расчета был исключен.

Проверка индексов на участке дельты р. Селенги по летнему снимку приведена в табл. 2.

*Таблица 2
Проверка точности индексов Sentinel-2 на участке дельты р. Селенги*

Индекс	Общая точность, %	Каппа Коэна
1. WRI	95,8962	0,8412
2. NDWI NIR SWIR	87,3534	0,1742
3. NDWI Green NIR	95,6198	0,8330
4. MNDWI Green SWIR	94,3182	0,7342
5. AWEI	95,8991	0,8366

Индекс NDWI NIR SWIR недостаточно хорошо справился со своей задачей. Результат оценки индексов по летнему снимку о. Ярки представлен в табл. 3.

*Таблица 3
Проверка точности индексов Sentinel-2 по о. Ярки*

Индекс	Общая точность, %	Каппа Коэна
1. WRI	93,8172	0,8068
2. NDWI NIR SWIR	90,4218	0,6987
3. NDWI Green NIR	94,5754	0,8298
4. MNDWI Green SWIR	93,1999	0,7889
5. AWEI	92,2923	0,7740

Очевидно, во всех случаях достаточно успешноправлялся с задачей классификации индекс NDWI Green NIR.

Аналогичные проверки были проведены по снимкам Landsat-8. Результаты в табл. 4.

Таблица 4

Проверка точности индексов Landsat-8

Индекс	С улучшенной резкостью		Без улучшения резкости	
	Общая точность, %	Каппа Коэна	Общая точность, %	Каппа Коэна
Проверка ровной береговой линии				
1. WRI	86,1077	0,7267		
2. NDWI NIR SWIR	80,9866	0,5934		
3. NDWI Green NIR	85,1471	0,7088	86,0826	0,7262
4. MNDWI Green SWIR	93,1326	0,8612	90,1998	0,8041
5. AWEI	68,9371	0,4262		
Проверка на участке дельты р. Селенга				
1. WRI	93,5430	0,7644	93,5804	0,7667
2. NDWI Green NIR	92,5360	0,7362	92,4719	0,7354
3. MNDWI Green SWIR	94,8868	0,7982	95,5052	0,8243
4. AWEI	92,8444	0,7440	92,7808	0,7435
Проверка по о. Ярки				
1. WRI	94,0599	0,8223	94,5259	0,8386
2. NDWI Green NIR	92,5758	0,7873	92,4631	0,7875
3. MNDWI Green SWIR	93,7409	0,8158	93,8880	0,8214
4. AWEI	70,0435	0,3914		

По итогам проведенного анализа для снимков Landsat-8 для классификации вода/суша лучше подходит индекс MNDWI Green SWIR. У Landsat-9 используется идентичный датчик OLI, поэтому рекомендация по использованию MNDWI Green SWIR распространяется и на этот спутник наблюдения.

Для снимков Landsat-5 также была сделана проверка по снимку конца лета. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5

Проверка точности индексов Landsat-5

Индекс	Общая точность, %	Каппа Коэна
Проверка ровной береговой линии		
1. WRI	99,5817	0,9738
2. NDWI Green NIR	99,3120	0,9601
3. MNDWI Green SWIR	99,4802	0,9691
4. AWEI	98,5953	0,9087
Проверка на участке дельты р. Селенга		
1. WRI	81,0117	0,3921
2. NDWI Green NIR	77,7365	0,3601
3. MNDWI Green SWIR	92,2335	0,7027
4. AWEI	80,0649	0,3554
Проверка по о. Ярки		
1. WRI	91,2218	0,6157
2. NDWI Green NIR	90,6674	0,6162
3. MNDWI Green SWIR	95,5038	0,7933
4. AWEI	88,1289	0,5100

По снимкам Landsat-5 так же, как и Landsat-8, для идентификации суши лучше подходит индекс MNDWI Green SWIR. У Landsat 5 и 4 использовался тот же датчик TM, поэтому индекс MNDWI должен хорошо подходить ко всем снимкам.

Рассмотренные индексы позволят ускорить процесс обработки снимков и оценить динамику изменений береговой линии. Необходимо учитывать, что данные проверки проводились для летних снимков, для весенних снимков понадобится дополнительная проверка пороговых значений для классификации вода/суша.

Список литературы

1. Виноградов А. Н. Исследование возможностей гиперспектральной съемки для мониторинга состояния водных объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 125–134.
2. Кутянина Т. И. Использование космических снимков для определения границ водоемов и изучения процессов эвтрофикации // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 28–33.
3. Лурье И. К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. М.: КДУ, 2008. 424 с
4. Google Планета Земля. URL: <https://www.google.ru/intl/ru/earth/> (дата обращения: 07.10.2022).

УДК 504.423

Предварительные результаты прогноза гидрологических характеристик по совместной модели атмосфера-море для Белого моря в летний период

Н. Ю. Бутаков (nikita.butakov.2019@mail.ru), К. Г. Рубинштейн (k.g.rubin@googlemail.com)

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Аннотация. Представлены результаты прогноза гидрологических характеристик по совместной модели атмосфера – море для региона Белого моря. Анализ результатов прогноза показал, что рассчитанные гидрологические характеристики Белого моря достаточно хорошо согласуются с особенностями вод Белого моря, описанными в научной литературе. Получены оценки качества прогноза температуры поверхности моря, на основе которых показано, что систематическое завышение рассчитанных значений температуры поверхности моря относительно данных анализа OISST составляет 0,4 °C. Ошибки прогноза температуры поверхности моря у берегов принимали сравнительно большие значения, тогда как в открытом море ошибки прогноза были значительно меньше.

Ключевые слова: совместная модель, взаимодействие атмосферы и моря, Белое море, температура поверхности моря.

Введение

Часто численный прогноз состояния атмосферы и океана производится отдельно друг от друга, что не позволяет учитывать динамику обратных связей между атмосферой и океаном. Отсутствие учета динамики обратных связей в

свою очередь может привести к существенным ошибкам прогноза, поскольку в реальности атмосфера и океан, находясь в непосредственном контакте друг с другом, представляют собой единую термогидродинамическую систему и непрерывно обмениваются внутренней и механической энергией и массой.

Первые попытки объединения атмосферных и океанических моделей были предприняты еще в конце 1960-х и начале 1970-х гг. [4; 5], но только в последние десятилетия прогресс в вычислительной технике способствовал активному развитию совместных моделей, компоненты которых основаны на полных уравнениях гидродинамики. Одной из таких моделей является модель COAWST [11], которая представляет собой связанную систему атмосфера-море-морские волны. Информация о компонентах совместной модели приведена ниже в табл. 1.

Таблица 1

Компоненты совместной модели

Атмосфера	WRF-ARW [7]
Море	ROMS [9]
Волновая модель	SWAN [10]

Для реализации совместной работы компонентов модели использовался пакет Model Coupling Toolkit (MCT) [6].

В ходе данной работы был проведен прогноз по совместной модели атмосфера – море, были представлены результаты прогноза основных гидрологических характеристик, а также были получены оценки качества прогноза температуры поверхности моря, так как ROMS передает в WRF только температуру поверхности моря и качество прогноза этого параметра в морской модели непосредственно влияет на качество прогноза метеопараметров в атмосферной модели.

В качестве объекта исследования было выбрано Белое море, поскольку Белое море вместе с прилегающими к нему территориями имеет важное промышленное и транспортное значение в экономике России, поэтому качественный прогноз состояния атмосферы и моря крайне важен для данного региона. И кроме того море имеет весьма замкнутую циркуляцию и, относительно небольшой размер.

Численному моделированию Белого моря было посвящено множество работ различных авторов, среди которых можно выделить [2; 3]. В приведенных работах моделирование моря проводилось в автономном режиме в нашей же работе море и атмосфера рассматриваются как части совместной системы с двухсторонним взаимодействием между компонентами.

Материалы и методы исследования

Интервал моделирования был выбран 02.06.2015–01.09.2015. Выбор летнего интервала моделирования был обусловлен отсутствием на нынешнем этапе работы учета в совместной модели характеристик морского льда. Расчет характеристик льда планируется производить после добавления модели CICE в совместную систему атмосфера – море – морской лед.

Для получения оценок качества прогноза температуры поверхности моря использовался анализ OISST [8] с пространственным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$. Данные о температуре поверхности моря из анализа OISST среднесуточные, поэтому для получения оценок результаты прогноза также были осреднены за каждые сутки. Результаты прогноза температуры поверхности моря интерполировались в узлы сетки анализа OISST, после чего считались статистические оценки качества прогнозов.

Для температуры поверхности моря были рассчитаны следующие статистические критерии:

Систематическая ошибка:

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) \quad (1)$$

Абсолютная ошибка:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(Y_i - \hat{Y}_i)| \quad (2)$$

Среднеквадратическая ошибка моделирования:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad (3)$$

где Y_i – смоделированное значение, \hat{Y}_i – фактическое значение, n – количество пар прогноз-наблюдение.

Анализ результатов прогноза

На рис. 1 представлены осредненные за весь период моделирования результаты прогноза гидрологических характеристик на верхнем уровне модели.

Анализ результатов прогноза гидрологических характеристик показывает, что общее движение вод в море направлено против часовой стрелки. У берегов Кольского полуострова проходит течение, направленное из Горла в Кандалакшский залив, далее воды перемещаются вдоль Карельского берега в Онежский залив. Поскольку влияние речного стока на циркуляцию вод в Белом море в данной работе не учитывалось, потоки вод из Онежской и Двинской губы в открытое море вдоль восточных берегов выражены слабо. Наибольшие скорости поверхностных течений наблюдались в Мезенской губе, существенные скорости течений наблюдались также в Горле и Воронке, что объясняется большими амплитудами приливов в этих районах (рис. 2). В Бассейне, Двинской и Кандалакшской губе, а также в южной части Баренцева моря скорости течений были меньше.

Наибольшие значения температуры поверхности моря наблюдались главным образом у берегов, в этом смысле особенно выделяется Онежская губа, в которой море прогревалось в среднем до 13°C .

Приток соленных вод из Баренцева моря приводил к тому, что наибольшая соленость наблюдалась в северной части Белого моря (в среднем до 34 %), в то время как в Онежской и Двинской губе соленость была меньше (22 %).

Уровень моря в заливах и Бассейне отклонялся от геоида Земли в положительную сторону, в данном случае стоит выделить Мезенскую губу, в которой уровень моря был выше геоида Земли в среднем на 0,6 м. С другой стороны, в Воронке и Баренцевом море уровень моря был, как правило, ниже геоида Земли.

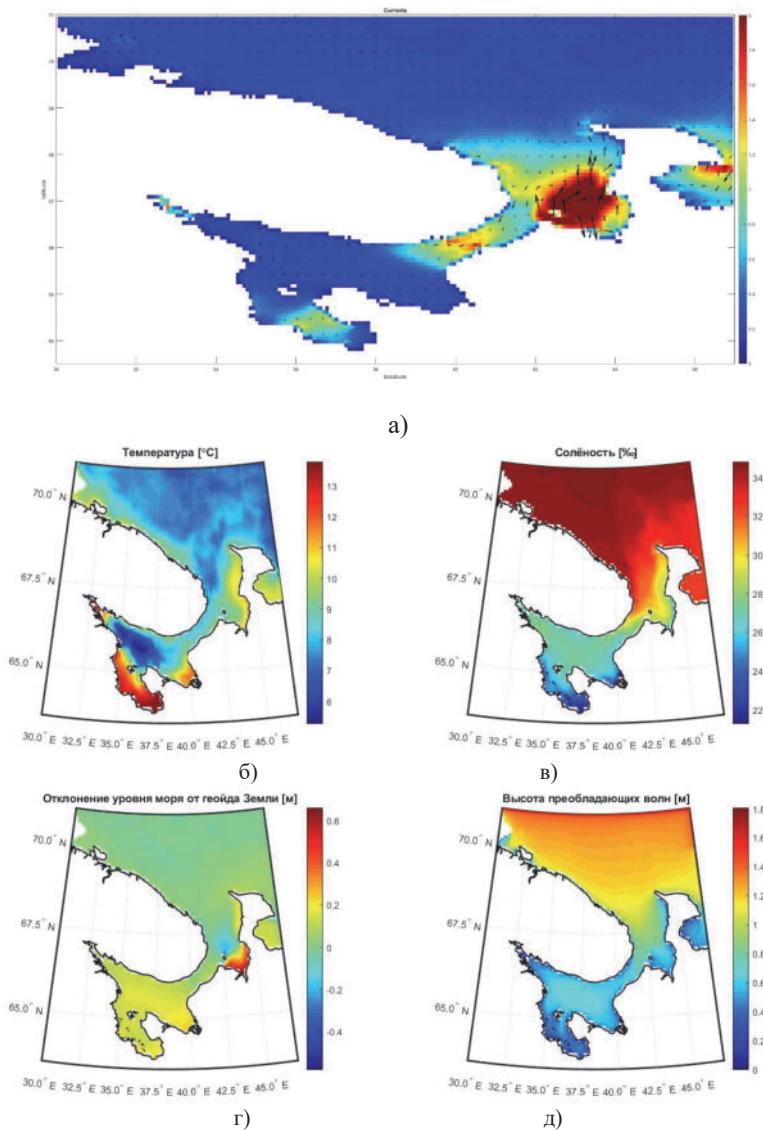
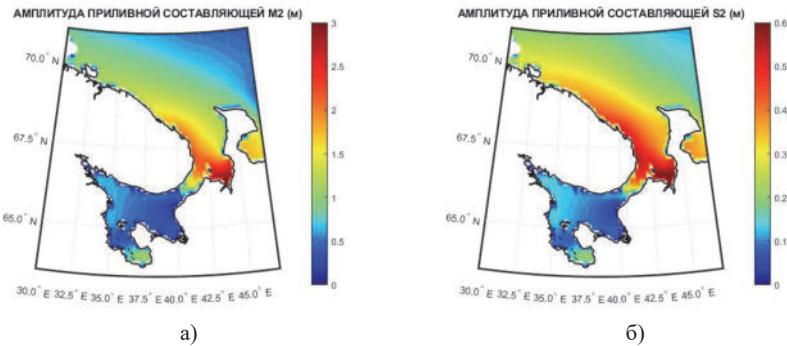


Рис. 1. Осредненные за весь период моделирования результаты прогноза скорости и направления течений (а), температуры (б), солености (в), отклонения уровня моря от геоида (г), высоты преобладающих волн (д)

Рис. 2. Амплитуды M_2 (а) и S_2 (б) составляющих

Наибольшая высота преобладающих волн наблюдалась в Воронке и Баренцевом море (в среднем до 1,8 м), в то время как в остальных районах длина пути, на которой ветер действует на водную поверхность (т. е. «разгона»), была недостаточной для генерации волн с большой высотой.

Ниже на рис. 3 представлены осредненные по времени вертикальные профили потенциальной температуры и солености для одного из узлов сетки, находящегося в Бассейне.

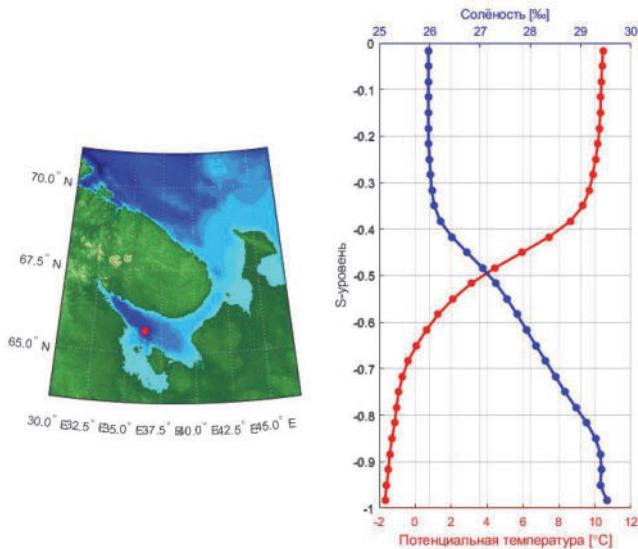


Рис. 3. Вертикальные профили потенциальной температуры и солености

Как видно из графиков на рис. 3, потенциальная температура уменьшается с глубиной, а соленость, наоборот, увеличивается. Приведенные на рис. 3 вертикальные профили температуры и солености являются типичными для Белого моря в летний период года [1].

Резюмируя вышесказанное, можно сделать вывод о том, что в целом рассчитанные гидрологические характеристики Белого моря достаточно хорошо согласуются с особенностями вод Белого моря, описанными, например, в работе [1].

Оценки качества прогноза температуры поверхности моря

В табл. 2 представлены осредненные по времени и пространству оценки качества прогноза температуры поверхности моря.

Таблица 2

Оценки качества прогноза температуры поверхности моря

BIAS, °C				MAE, °C				RMSE, °C			
MEAN	P50	MIN	MAX	MEAN	P50	MIN	MAX	MEAN	P50	MIN	MAX
0,40	0,44	-0,22	1,23	0,61	0,59	0,21	1,49	0,83	0,78	0,35	1,66

В табл. 2 MEAN – среднее значение ошибки; MIN и MAX – минимальное и максимальное значение ошибки, соответственно; P50 – 50-й процентиль.

Анализируя приведенные в табл. 2 статистические критерии, можно сделать вывод о том, что рассчитанные по модели ROMS значения температуры поверхности моря были систематически завышены относительно данных анализа OISST в среднем на 0,4 °C.

Ниже на рис. 4 представлено пространственное распределение систематической, абсолютной и среднеквадратической ошибок прогноза температуры поверхности моря.

Ошибки прогноза были больше у берегов, чем в открытом море. Особенно большие значения ошибки принимали в Онежском заливе и вблизи Канинского берега. В этих районах наблюдалось особенно сильное систематическое завышение рассчитанной температуры поверхности моря.

На рис. 5 представлены графики временного хода ошибок прогноза температуры поверхности моря.

Анализируя графики, представленные на рис. 5, можно сделать вывод о том, что почти на протяжении всего периода моделирования наблюдалось систематическое завышение рассчитанной температуры поверхности моря. Максимальных значений ошибки прогноза достигали в начале августа, так, например, абсолютная ошибка в этот период составляла 1,5 °C.

Заключение

Подводя итоги проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

- Рассчитанные гидрологические характеристики Белого моря достаточно хорошо согласуются с особенностями вод Белого моря, описанными в научной литературе.

- Наблюдалось систематическое завышение рассчитанных значений температуры поверхности моря относительно данных анализа на $0,4^{\circ}\text{C}$.
- Наблюдалась картина, когда ошибки прогноза температуры поверхности моря у берегов принимали сравнительно большие значения, тогда как в открытом море ошибки прогноза были значительно меньше.

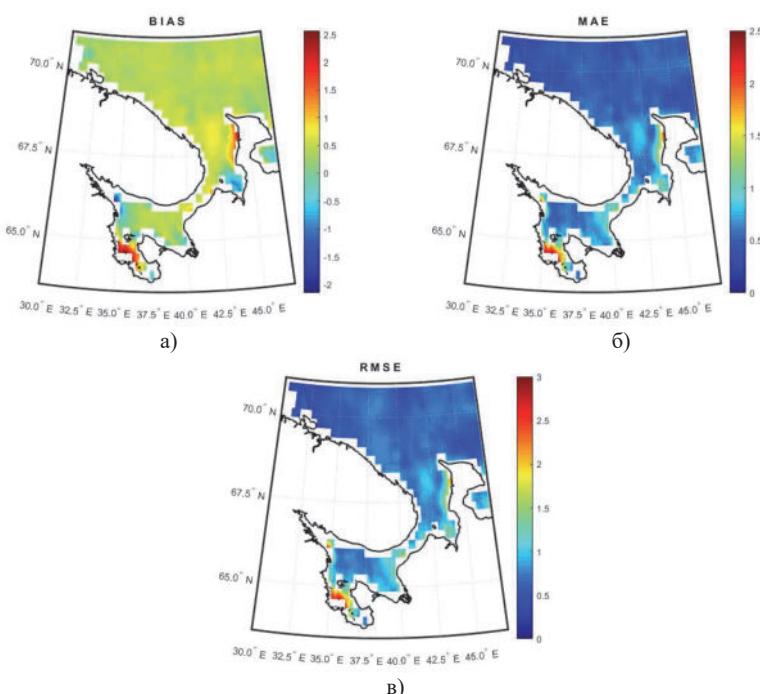


Рис. 4. Систематическая (а), абсолютная (б) и среднеквадратическая (в) ошибки прогноза температуры поверхности моря

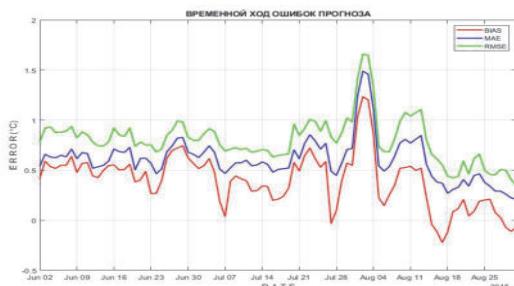


Рис. 5. Графики временного хода средних ошибок прогноза температуры поверхности моря

Список литературы

1. Безруков Ю. Ф., Пасынкова Л. А., Кудрянь Е. А. Моря Евразии. Симферополь : Таврич. нац. ун-т им. В. И. Вернадского, 2008. Ч.1. Северо-западные моря.
2. Кораблина А. Д., Архипкин В. С., Самборский Т. В. Особенности формирования штормовых нагонов в динамической системе Белое море – устьевая область р. Северная Двина по результатам численного моделирования // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2016. № 1. С.78–86.
3. Чернов И. А., Толстиков А. В. О численном моделировании Белого моря // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 7. С. 16–26.
4. Bryan K., Manabe S., Pacanowski R.C. A global ocean-atmosphere climate model. Part 2. The oceanic circulation // J. Phys. Oceanogr. 1975.
5. Manabe S., Bryan K., Climate Calculations with a Combined Ocean-atmosphere Model // J. Atmos. Sci. 1969. V. 26. P. 786–789.
6. Mathematics and Computer Science. URL: <https://www.anl.gov/mcs> (дата обращения: 23.10.2022).
7. Mesoscale and microscale meteorology laboratory. URL: <https://www.mmm.ucar.edu/> (дата обращения: 23.10.2022).
8. National Centers for Environmental Information. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/> (дата обращения: 23.10.2022).
9. Regional Ocean Modeling System (ROMS). URL: <https://www.myroms.org/> (дата обращения: 23.10.2022).
10. Simulating Waves Nearshore. URL: <https://swanmodel.sourceforge.io/> (дата обращения: 23.10.2022).
11. Sutel U., Pezzi L. COAWST User's Guide. 3rd ed. 2020

УДК 543.3

Сезонная динамика гидрохимических показателей озерных вод Сургутского района

М. К. Величко (manioka333@mail.ru), Е. А. Шорникова (shornikova_ea@surgu.ru)

Сургутский государственный университет, Сургут

Аннотация. Представлены результаты гидрохимического анализа воды антропогенно нарушенных озер Вачлор и Тлониклор по гидрохимическим показателям, на основании которого выявлена сезонная динамика. Исследования выполнены в сентябре, апреле и мае 2020–2022 гг. Произведен химический анализ проб воды по 23 показателям с применением методов титриметрии, флуориметрии, фотометрии, капиллярного электрофореза и атомно-абсорбционной спектроскопии. Выявлена сезонная динамика показателей солевого состава, концентрации биогенных ионов, металлов, органических веществ, перманганатной окисляемости.

Ключевые слова: гидрохимический анализ озерных вод, сезонная динамика, накопление органики.

Промышленный прогресс, связанный с развитием нефтегазодобывающей отрасли в Ханты-Мансийском автономном округе – Югра, неминуемо оказывает негативное влияние на окружающую среду, в том числе ведет к ухудшению качества поверхностных вод. Для того чтобы планировать мероприятия, направленные на защиту окружающей среды, объективно оценивать экологическую обстановку территории, своевременно выявлять причины, источники и диапазон

загрязнений, – необходимо регулярно проводить экологический мониторинг, который служит непосредственным индикатором экологической ситуации в регионе, определяющим важность подобных исследований. Следовательно, беспрерывное наблюдение за качеством вод, систематические гидрохимические исследования являются важнейшей и необходимой задачей экологического мониторинга, чтобы сохранить экосистемы нашего округа [3].

Объектами исследования являются озера Вачлор и Тлониклор на севере Сургутского района. Отбор проб выполнялся в сентябре, апреле и мае 2020–2022 гг. Был произведен химический анализ проб воды по 23 показателям с применением методов титриметрии, флуориметрии, фотометрии, капиллярного электрофореза и атомно-абсорбционной спектроскопии.

Для оценки качества вод полученные результаты сопоставили с нормативами ПДК_{вр} для рыбохозяйственных водоемов.

Выявленные концентрации растворенного в воде кислорода в весенние и осенние периоды различались более чем в 1,5 раза. В оз. Вачлор наблюдается существенное снижение концентраций растворенного кислорода в осенние периоды. При этом в оз. Тлониклор осенью содержание растворенного кислорода резко увеличивается относительно весенних проб в оз. Вачлор.

Значения насыщения воды кислородом колебались в диапазоне 64,4–136,1 %. Отмечается дефицит кислорода в 66 % проб воды. Средний процент насыщения воды кислородом в оз. Вачлор в весенних пробах составил 106 %, а в осенних 72,02 %, а в оз. Тлониклор в весенних пробах этот показатель достигал 78 %, а осенних 118,74 %. Значения БПК₅ в весенние и осенние периоды различались более чем в 1,5 раза. Снижение концентраций растворенного кислорода вероятней всего связано с накоплением органики, на окисление которой используется значительное количество кислорода.

Значение ПО во всех пробах оз. Вачлор осенью не соответствуют нормативам ПДК_{вр} и максимальное превышение достигает 1,2 ПДК_{вр}. Значения перманганатной окисляемости в весенние и осенние периоды различалась более чем в 1,5 раза.

Массовые концентрации нефтепродуктов за весь период исследования в озерах Вачлор и Тлониклор различались практически в два с половиной раза. Выявленные концентрации нефтепродуктов за весь период проведения исследования превышали нормативные требования во всех отобранных пробах воды оз. Вачлор с кратностью в 1,5ПДК_{вр}. В оз. Тлониклор превышений ПДК_{вр} нефтепродуктов не обнаружено. В озерах Вачлор и Тлониклор выявлено значительное превышение ПДК_{вр} фенолов (10ПДК_{вр} и 15ПДК_{вр}). Такой результат для Вачлора может говорить об антропогенной нагрузке, оказываемой на водоем, учитывая, что он находится в границах поселка, лицензионных участков нефтедобычи и трубопроводов.

Таблица 1
Содержание органических веществ в исследуемых озерах

Показатель		БПК ₅ , мг/дм ³	Перманг. окисляемость, мг/дм ³	Нефтепродукты, мг/дм ³	Фенолы, мг/дм ³
ПДК _{бр} , мг/дм ³		2,1	15	0,05	0,001
Наименование озера	Номер пробы				
Осенняя межень 2020 г.					
Вачлор	1	1,9	18,1	0,063	0,011
Вачлор	2	2,3	15	0,064	0,012
Вачлор	3	2,8	16,6	0,071	0,011
Тлонклор	1	5,8	8	0,034	0,012
Тлонклор	2	4,2	14,3	0,039	<0,001
Тлонклор	3	6,5	13,5	0,042	0,015
Половодье 2021 г.					
Вачлор	1	4,83	8,1	0,066	0,009
Вачлор	2	5,34	9,9	0,064	0,010
Вачлор	3	3,87	12,3	0,074	0,010
Тлонклор	1	1,34	7,4	0,037	<0,001
Тлонклор	2	2,65	8,9	0,032	<0,001
Тлонклор	3	3,45	7,5	0,028	<0,001
Осенняя межень 2021 г.					
Вачлор	1	2,3	17,1	0,072	0,015
Вачлор	2	1,6	17,3	0,077	0,017
Вачлор	3	2,2	15	0,079	0,018
Тлонклор	1	5,4	8	0,045	0,011
Тлонклор	2	5,8	14,3	0,049	0,011
Тлонклор	3	6,9	13,5	0,055	0,010
Половодье 2022 г.					
Вачлор	1	5,1	11,3	0,065	0,008
Вачлор	2	5,2	7,5	0,076	0,010
Вачлор	3	4,7	9,9	0,061	0,006
Тлонклор	1	2,5	8,8	0,029	<0,001
Тлонклор	2	2,8	8,5	0,032	0,009
Тлонклор	3	1,12	7,4	0,038	0,009

Примечание: превышения ПДК_{бр} выделены жирным шрифтом

Согласно предыдущим исследованиям, в оз. Вачлор к 2021 г. произошло снижение концентрации фенолов в 5,4 раза по сравнению с результатами полученными в 2018 и 2019 гг. Также в 2020 и 2021 гг. в оз. Вачлор наблюдается снижение концентрации нефтепродуктов почти в 2 раза относительно 2019 г. [7].

В ионном составе преобладает натрий, кальций и хлориды. Тип минерализации озер Вачлор и Тлонклор – хлоридно-натриевый, что, по литературным данным, не соответствует характерной данной местности геохимической обстановке [5].

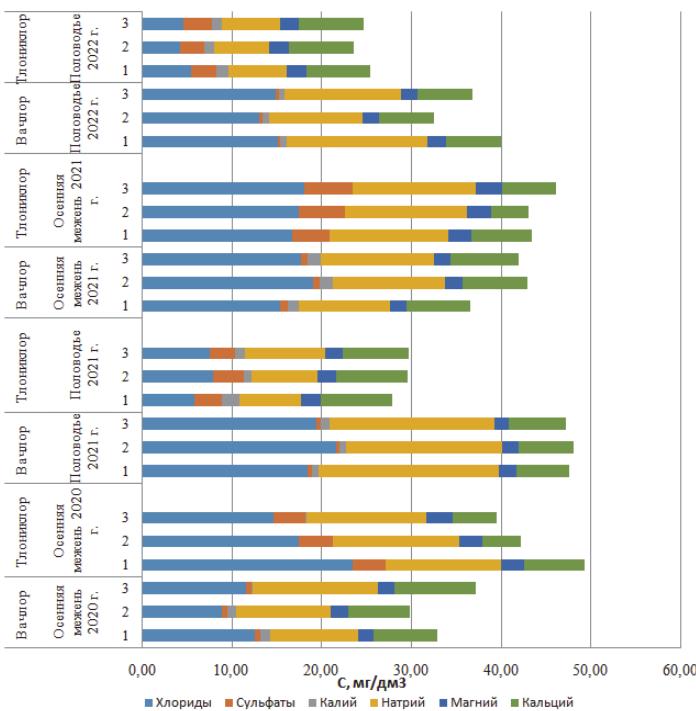


Рис. 1. Главные ионы за период исследования

В исследованных озерах концентрации хлоридов в весенние периоды в оз. Вачлор и Тлониклор различалась более чем в 3,5, а осенью в 2,8 раза. Концентрации хлорид-ионов подвержены сезонным колебаниям на оз. Тлониклор они возрастают в осенние периоды, а на оз. Вачлор к осени содержание хлоридов снижается, что может быть связано как с естественными колебаниями, так и с незначительным солевым загрязнением [1].

Также сезонному колебанию подвержены ионы натрия. Концентрации натрия в оз. Вачлор и оз. Тлониклор различались более чем в 3,3 раза в весенние и 1,5 в осенние периоды. За счет хлоридов и натрия отмечается заметное увеличение общего содержания солей в сезон их повышения почти в 2 раза в весенне-летние периоды и в 1,3 в 4 раза в осенние периоды. Повышение концентраций данных ионов может быть связано с поступающими в водоем подготаврными водами.

Суммарная концентрация биогенных ионов в весенние периоды в оз. Вачлор составила 3,9674 мг/дм³, а в оз. Тлониклор 0,1516 мг/дм³, что в 26 раз ниже, чем в оз. Вачлор.

Таблица 2
Содержание биогенных ионов

Показатель		Нитриты, мг/дм ³	Нитраты, мг/дм ³	Аммоний-ион, мг/дм ³	Фосфаты, мг/дм ³
ПДК_{вр}, мг/дм³		0,08	40	0,5	0,2
Наименование озера	Номер пробы				
Осенняя межень 2020 г.					
Вачлор	1	0,0312	1,714	0,152	1,856
Вачлор	2	0,0418	1,468	0,189	2,112
Вачлор	3	0,0564	1,938	<0,05	1,973
Тлонклор	1	0,0264	<0,1	0,143	<0,05
Тлонклор	2	0,0236	<0,1	0,128	<0,05
Тлонклор	3	0,0396	<0,1	0,113	<0,05
Половодье 2021 г.					
Вачлор	1	0,0263	0,263	0,127	2,393
Вачлор	2	0,0279	0,199	0,273	1,783
Вачлор	3	0,0331	0,393	0,296	2,134
Тлонклор	1	0,0699	0,211	<0,05	0,075
Тлонклор	2	0,0597	0,159	<0,05	0,064
Тлонклор	3	0,0554	0,178	<0,05	0,078
Осенняя межень 2021 г.					
Вачлор	1	0,0567	2,234	0,167	1,894
Вачлор	2	0,0578	2,563	0,163	1,876
Вачлор	3	0,0648	2,628	0,173	2,119
Тлонклор	1	0,0344	<0,1	0,156	<0,05
Тлонклор	2	0,0312	<0,1	0,158	<0,05
Тлонклор	3	0,0389	<0,1	0,159	<0,05
Половодье 2022 г.					
Вачлор	1	0,012	0,381	0,189	2,671
Вачлор	2	0,028	0,412	0,199	1,934
Вачлор	3	0,026	0,376	0,237	2,256
Тлонклор	1	0,0599	0,256	0,111	0,088
Тлонклор	2	0,0513	0,199	0,106	0,067
Тлонклор	3	0,0563	0,234	0,101	0,094

Примечание: превышения ПДК_{вр} выделены жирным шрифтом.

Концентрации ионов аммония в оз. Вачлор заметно выше, чем в Тлонклоре за период исследования. Превышение ПДК_{вр} не отмечено. Для водных объектов данной ландшафтно-климатической зоны вследствие выраженного дефицита кислорода является характерным накопление ионов аммония, кроме того, присутствие в водоеме аммония может говорить о поступлении хозяйствственно-бытовых сточных вод [6].

Концентрации нитратов в весенние и осенние периоды различались более чем в 12,6 раз. Превышений ПДК_{вр} по нитратам не отмечено, но относительно весенних периодов, в осенних пробах оз. Вачлор зафиксировано значительное увеличение концентраций нитратов. Это свойственно для осеннего периода и

связано с тем, что в водоеме происходило накопление органики за летний период и к осени происходит ее окисление до нитратов.

Суммарная концентрация металлов в весенне-летние периоды оз. Тлониклор составила 1,85 мг/дм³, а оз. Вачлор – 1,074 мг/дм³, что почти в 2 раза ниже, чем в оз. Тлониклор, а осенью их концентрации различалась почти в 1,5 раза.

В структуре металлов преобладают железо, марганец и цинк. Концентрации железа общего в оз. Тлониклор и оз. Вачлор различались более чем в 8 раз за весь период отбора проб. За счет высоких концентраций железа отмечается существенное увеличение общего содержания металлов в оз. Тлониклор. Превышение ПДКвр по содержанию железа и марганца выявлено в 100 % проб.

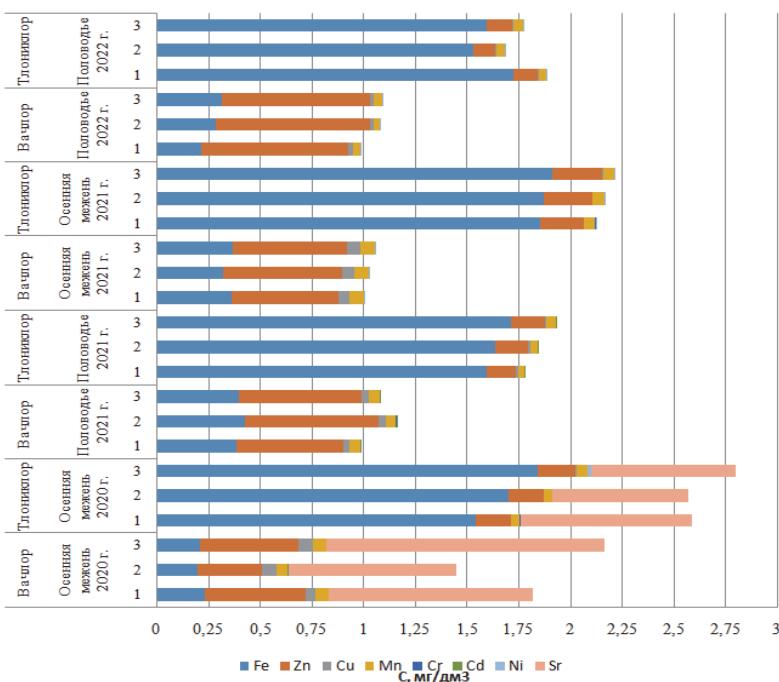


Рис. 2. Концентрации металлов в исследуемом периоде

Высокое содержание железа и марганца обусловлено геохимическими особенностями Западной Сибири: ожелезненность почв и заболоченность местности. Эти элементы интенсивно вымываются кислыми водами из глеевых почв в восстановительной обстановке [2].

Содержание цинка в озере Вачлор заметно увеличивается в весенне-летние периоды (более чем в 4,2 раза), тогда как в оз. Тлониклор значения данного металла значительно ниже относительно Вачлора в целом. Концентрации цинка во

всех пробах исследуемых озер значительно превышают норматив ПДК_{вр} для рыбохозяйственных водоемов (14,3–64,5ПДК_{вр}).

Причиной высоких концентраций цинка в воде, вероятней всего, является нефтедобывающая деятельность (бурение скважин, прокладка нефе- и газопроводов, строительство дорог), нарушающая почвенный слой и способствующая повышению миграции цинка, который вымывается из почвы [4].

В оз. Вачлор выявлен существенный рост концентраций меди в осенних пробах более чем в 2 раза относительно весенне-летних периодов и более чем в 24 раза относительно оз. Тлониклор за весь период. Выявленные концентрации меди не соответствуют нормативам ПДК_{вр}, достигая значений в 3–71ПДК_{вр}. Содержание стронция в исследуемых озерных водах значительно превышает установленный норматив для рыбохозяйственных водоемов и достигают 2–3,4ПДК_{вр}.

Высокое содержание меди и стронция в водоемах свидетельствует о возможном поступлении сточных вод, например – из пос. Ульт-Ягун (оз. Вачлор), или загрязненными стоками от нефтедобычи.

В результате исследования была выявлена сезонная динамика показателей солевого состава, концентрации биогенных ионов, металлов, органических веществ, перманганатной окисляемости. Воды озер по результатам исследования характеризуются как слабоминерализованные, в солевом составе преобладает натрий, кальций и хлориды. Выявлена перестройка ионного состава вод озер на хлоридно-натриевый тип. Характерно слабое насыщение воды кислородом. Содержание биогенных ионов низкое в оз. Тлониклор. Также отмечаются высокие концентрации металлов. В результате исследования было выявлено превышение нормативов ПДК_{вр} для рыбохозяйственных водоемов по 11 показателям.

Список литературы

1. Ефимова М. В., Стрих Н. И., Курбанов В. Ш. Воздействие нефтегазового комплекса на экосистемы Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Научные ведомости. 2011. № 3. С. 110–114.
2. Характеристика природных вод на территории Ханты-Мансийского Автономного Округа / Т. Я. Корчина, В. И. Корчин, Г. И. Кушникова, В. Л. Янин // Экология человека. 2010. № 8. С. 9–12.
3. Московченко Д. В., Убайдулаев А. А. Влияние разливов нефти на загрязнение поверхностных вод Ханты-Мансийского автономного округа – Югры // Науки о земле. 2014. № 4. С. 5–16.
4. Московченко Д. В. Эколого-геохимическое состояние водных объектов на территории заказника «Сургутский» // ВЭЛЛ. 2007. № 7.
5. Московченко Д. В., Пуртов В. А., Завьялова И. В. Гидрохимическая характеристика водо-сборных бассейнов Ханты-Мансийского автономного округа // ВЭЛЛ. 2008. № 8.
6. Судаков В. М., Шлыкова Л. П. Гидрохимическая характеристика озер Ханты-Мансийского округа // Рыбное хозяйство Обь-Иртышского бассейна. Свердловск : Сред.-Урал. кн. изд-во, 1977. С. 133–140.
7. Шорникова Е. А., Гадельшина С. Р. Эколого-гидрохимическая характеристика рыбохозяйственных озер Среднего Приобья // Озера Евразии: проблемы и пути их решения Материалы II Международной конференции, 19–24 мая 2019 г. Казань : Акад. наук Респ. Татарстан (Казань), 2019. С. 209–213.

УДК 556.5

Долгосрочный прогноз стока рек АЗРФ с использованием регрессионных зависимостей

Е. В. Гайдукова (oderiut@mail.ru), А. О. Яновская (nastyynovskay@gmail.com),
М. С. Дрегваль (msdregval@mail.ru), А. А. Батмазова (batmazovaa@mail.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Рассмотрена методика долгосрочного прогнозирования, основанная на построении регрессионных зависимостей с различным набором предикторов. В качестве потенциальных предикторов анализировались гидрометеорологические характеристики, которые оказывают влияние на формирование слоя стока весеннего половодья в бассейне реки Арктической зоны Российской Федерации. В качестве объекта для апробации разрабатываемого подхода выбран водосбор р. Турухан, на территории которого ведется добыча углеводородного сырья и оксидных руд. Получены удовлетворительные результаты прогнозов при учете взаимосвязей слоя стока весеннего половодья с наивысшим уровнем воды, максимальными снегозапасами, влажностью воздуха и температурой почвы на глубине 0,2 м. Минимальная заблаговременность прогнозов составляет один месяц, но при определенном наборе предикторов заблаговременность можно увеличить до двух месяцев.

Ключевые слова: корреляция, предикторы, р. Турухан, слой стока весеннего половодья.

Введение

Освоение и изучение Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) является одной из важнейших задач на ближайшие годы. Исследований требуют не только богатые углеводородом почвы, но и водные ресурсы зоны. Научные прогнозы гидрологического режима рек всегда будут необходимы и значимы для различных отраслей промышленности, связанных с использованием водных ресурсов. Прогнозы имеют особую важность в предупреждении и предсказывании опасных водных явлений.

Арктическая зона РФ – это северная оконечность Европейской и Азиатской частей РФ, расположена она вдоль побережья морей Северного Ледовитого океана: Баренцева, Карского, Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского. Это самая протяженная морская граница России. Субъекты, входящие в состав АЗРФ, представлены на рис. 1.

Цель исследования заключалась в выявлении взаимосвязей между гидрометеорологическими характеристиками и слоем речного стока за весеннеевое половодье, в построении регрессионных уравнений, в выпуске поверочных долгосрочных прогнозов и их оценке. Минимальная заблаговременность прогнозов (промежуток времени от даты составления прогноза до даты наступления или же даты окончания предсказываемого явления) принята равной одному месяцу.

Исходные данные

В качестве экономически важного региона был выбран Красноярский край, в котором проводится добыча полезных ископаемых. От Красноярского края в состав АЗРФ входит всего несколько районов (рис. 1). Этими районами являются Таймырский Долгано-Ненецкий муниципальный район, территория городского округа Норильска и Туруханский район.



Рис. 1. Арктическая зона РФ и ее граница [1]:

- 1 – Мурманская область;
- 2 – Республика Карелия;
- 3 – Архангельская область;
- 4 – Ненецкий автономный округ;
- 5 – Ямало-Ненецкий автономный округ;
- 6 – Республика Коми;
- 7 – Красноярский край;
- 8 – Республика Саха (Якутия);
- 9 – Чукотский автономный округ;
- 10 – Земли и острова в Северном Ледовитом океане

Для дальнейшего исследования и изучения была выбрана р. Турухан, находящаяся в Туруханском районе. В районе открыто месторождение углеводородного сырья, помимо этого район является представителем одного из наиболее крупных в России месторождения оксидных руд, расположенного в северной части Енисейского кряжа, а точнее – Порожинское месторождение марганцевых руд.

Туруханский район расположен на стыке Западно-Сибирской плиты и Сибирской платформы и это заболоченная местность, которая подвергалась зырянскому оледенению; широко распространены буровато-желтые иллювиально-гумусовые почвы. Климат резко континентальный: зимой температура может снижаться до -60°C , летом – доходить до $+35^{\circ}\text{C}$.

Река Турухан является левым притоком Енисея (рис. 2). В верхнем течении р. Турухан имеет достаточно высокие отлогие берега, состоящие из рыхлой глины и иловатого песка, сквозь которые просачиваются железистые ключи, окрашивающие воду в красноватый цвет и добавляющие ей неприятный привкус

[4]. Река относится к бассейну Северного Ледовитого Океана, к бассейну р. Енисей; площадь водосбора в замыкающем створе – 10 100 км², длина – 639 км, ширина – от 42,6 до 149 м, максимальная глубина – 12,8 м.

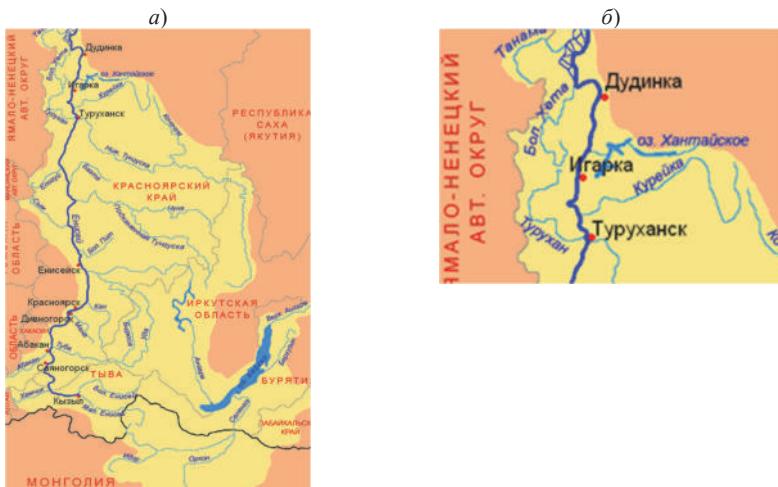


Рис. 2. Бассейн р. Енисей (а) и р. Турухан (б) [4]

В качестве расчетного гидрологического створа была выбрана гидрологическая станция Янов Стан, расположенная на р. Турухан в одноименном поселке и ведущая гидрологические наблюдения с 19.06.1938.

В качестве репрезентативной метеорологической станции выбрана Гидрометеорологическая обсерватория Туруханск, которая проводит метеорологические наблюдения с декабря 1843 г.

Для исследования собраны следующие исходные данные:

- расходы воды (среднемесячные данные);
- уровни воды (среднемесячные данные);
- количество осадков (среднемесячные данные);
- температура приземного воздуха (среднемесячные данные);
- температура почвы по глубинам 0,2 и 0,4 м (среднемесячные данные);
- относительная влажность воздуха (среднемесячные данные);
- высота снежного покрова (среднемесячные данные);
- наивысшие значения снежного покрова;
- продолжительность солнечного сияния (среднемесячные данные).

Данные собирались за периоды с 2008 по 2016 г. и с 1966 по 1970 г., за 1961, 1963 гг. почти за все месяцы, исключая июнь, июль и август для метеорологических данных.

В выявлении регрессионных зависимостей участвовали все годы кроме 2014, 2015 и 2016 гг. Эти годы были использованы для апробации выявленных взаимосвязей.

Методика долгосрочных прогнозов, основанная на регрессионных зависимостях

Для определения периода половодья строились гистограммы уровней и расходов воды за все годы (рис. 3). Половодье начинается в пятом календарном месяце, мае, заканчивается в июле. Этот временной промежуток и был взят за период половодья.

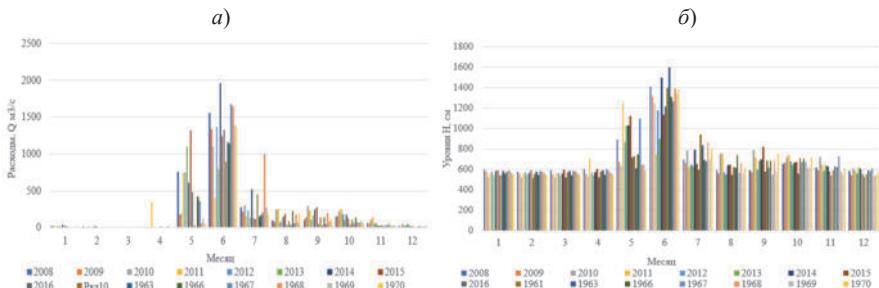


Рис. 3. Гистограммы среднемесячных расходов (а) и уровней (б) воды на р. Турухан

Расходы воды переведены в слой стока весеннего половодья по формуле, в которую вошли сами среднемесячные значения расходов воды за период половодья, количество суток половодья, площадь водосбора и количество секунд в сутках [2].

Были построены графики связи с использованием среднемесячных значений за февраль, март и апрель по всем годам (кроме 2014–2016 гг.). Обозначенные месяцы выбраны с учетом заглавовременности возможных прогнозов – в минимум один месяц. В выявлении связей также были задействованы наивысшие значения снежного покрова за месяц.

Предварительно структурировав все используемые гидрометеорологические данные за февраль, март и апрель, включая слой стока, рассчитывалась корреляционная матрица, из которой выбирались наибольшие значения коэффициентов корреляции со слоем стока. По итогам анализа полученных данных были выбраны следующие коэффициенты корреляции, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции предикторов со слоем стока за весеннеев половодье

Предиктор	Месяц	R
Осадки, мм	Апрель	-0,18
Температура воздуха, °C	Март	0,53
Влажность воздуха, %	Март	0,64
Средняя высота снежного покрова, см	Март	0,62
Максимальная высота снежного покрова, см	Апрель	0,66
Продолжительность солнечного сияния, дни	Февраль	-0,56
Температура почв на глубине 0,2 м, °C	Март	0,83
Температура почв на глубине 0,4 м, °C	Март	0,79
Средние уровни воды, см	Март	0,79
Наивысшие уровни воды, см	Март	0,82

Наибольшими значениями корреляции обладают связи между рядами слоя весеннего половодья и среднемесячными значениями уровня воды, и также наивысшим уровнем за соответствующий месяц. В табл. 1 видно, что лучше всего из всех трех месяцев со слоем стока весеннего половодья коррелируют данные за март, наименьшее же значение коэффициента выявлено в апреле.

Далее было получено уравнение регрессии, представляющее собой отношение между значениями одной переменной – x_i и наблюдаемыми значениями другой переменной – y . Уравнение регрессии показывает степень взаимосвязи параметров между собой. В качестве входного интервала y был выбран слой стока за половодье Y , а x – все данные предикторов за 13 лет. Ниже представлено уравнение регрессии, построенное по подобию простейшего уравнения линейной регрессии $y = ax + b$ (где a – коэффициент, x – предиктор, а b – пересечение с осью y):

$$Y = -1,36x_1 + 8,58x_2 - 3,23x_3 - 1,26x_4 + 1,25x_5 + 0,36x_6 + \\ + 44,04x_7 - 50,43x_8 - 4,41x_9 - 6,22x_{10} - 393,50, \quad (1)$$

где x_1 – осадки (мм) за апрель; x_2 – температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) за март; x_3 – влажность воздуха (%) за март; x_4 – средняя высота снежного покрова (см) за март; x_5 – максимальная высота снежного покрова (см) за апрель; x_6 – продолжительность солнечного сияния (дни) за февраль; x_7 – температура почв на глубине 0,2 м ($^{\circ}\text{C}$) за март; x_8 – температура почв на глубине 0,4 м ($^{\circ}\text{C}$) за март; x_9 – средние уровни воды (см) за март; x_{10} – наивысшие уровни воды (см) за март.

Коэффициент множественной регрессии R , показывающий тесноту связи всех характеристик, равен 0,985. На рис. 4 представлен график соотношения фактических величин слоя стока за половодье и рассчитанных по уравнению с 10 предикторами. Отклонение рассчитанных от фактических величин незначительное.

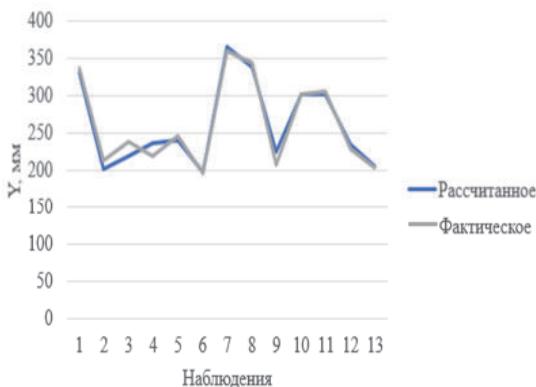


Рис. 4. Рассчитанные и фактические величины слоя стока весеннего половодья при использовании 10 предикторов

С использованием полученного уравнения регрессии давался поверочный прогноз на 2014, 2015 и 2016 гг. Данная методика относится к классу статистического подхода долгосрочного прогнозирования [3]. Исходная информация и результаты апробации методики представлены в табл. 2. Получено, что за 2015 г. прогнозное значение больше фактического, погрешность за 2016 г. меньше 10 %, что является показателем удовлетворительных прогнозов. Погрешность за 2014 г. в 48,1 % квалифицирует прогнозы как неудовлетворительные.

Таблица 2

Долгосрочные прогнозы слоя стока весеннего половодья по уравнению с десятью предикторами на р. Турухан

Предиктор	Год		
	2014	2015	2016
Осадки за апрель, мм	56,3	33,9	13
Температура воздуха за март, °C	-9,82	-13,06	-11,55
Влажность воздуха за март, %	76	74	77
Средняя высота снежного покрова за март, см	121,5	133,4	102,1
Максимальная высота снежного покрова за апрель, см	110,3	143,1	98,1
Продолжительность солнечного сияния за февраль, дни	93	46	69
Температура на глубине 0,2 м за март, °C	-1,65	-1,31	-3,20
Температура на глубине 0,4 м за март, °C	-0,84	-0,83	-2,46
Средние уровни воды за март, см	556	598	518
Наивысшие уровни воды за март, см	562	602	521
Слой стока			
Фактическое значение, мм	443	283	219
Прогнозируемое значение, мм	230	326	198
Погрешность, %	48,1	-15,4	9,6

Использование десяти предикторов при прогнозах может вызвать практические трудности. Кроме того, в прогностических уравнениях регрессии рекомендуется ограничиваться 3–4 независимыми переменными [2]. Следовательно, при дальнейшем исследовании возник вопрос: какие предикторы можно убрать из уравнения при наличии значимой связи практически всех рассматриваемых 10 предикторов со слоем весеннего половодья.

Были проведены последовательные расчеты с поочередным исключением одного из используемых предикторов. В табл. 3 представлены полученные погрешности при поверочных прогнозах. Выявлено, что однозначно должны присутствовать в уравнении регрессии следующие предикторы: наивысшие значения уровня воды, влажность воздуха, максимальная высота снежного покрова.

В качестве четвертого предиктора рассмотрены продолжительность солнечного сияния, температура почвы на глубине 0,2 м, средние высоты снежного покрова.

График соотношения фактических и рассчитанных значений слоя стока за половодье по трем предикторам за 13 лет представлен на рис. 5. Полученные погрешности при проведении поверочных прогнозов показаны в табл. 4. По срав-

нению с табл. 2 погрешность за 2014 г. стала меньше на 18 %, за 2015 г. – увеличилась на 10 %, в 2016 г. – уменьшилась на 20 %. В целом эффективность методики снизилась.

Таблица 3

Отбор наиболее значимых предикторов

Предиктор	Год		
	2014	2015	2016
	Погрешность, %		
Со всеми предикторами	48,1	-15,4	9,6
Без осадков	34,6	-7,9	-8,8
Без температуры воздуха	40,2	-6,0	2,9
Без влажности воздуха	42,8	-16,9	-18,6
Без средней высоты снежного покрова	49,9	-12,3	27,5
Без максимальной высоты снежного покрова	50,2	-12,5	26,7
Без продолжительности солнечного сияния	47,7	-16,5	-10,1
Без температуры на глубине 0,2 м	45,2	-20,6	-19,6
Без температуры на глубине 0,4 м	44,1	-19,6	-17,2
Без средних уровней воды	49,5	-22,7	0,96
Без наивысших уровней воды	46,3	-24,6	-18,6
Без уровней	41,2	-23,2	-41,2

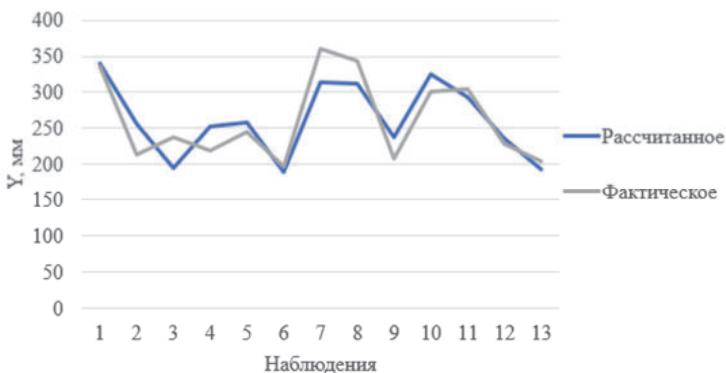


Рис. 5. Рассчитанные и фактические величины слоя стока весеннего половодья при использовании трех предикторов

В табл. 5 показан результат, в виде погрешностей, поверочных прогнозов по уравнению с четырьмя разными предикторами: поочередно добавлялась продолжительность солнечного сияния, температура на глубине 0,2 м и средняя высота снежного покрова.

Таблица 4

Долгосрочные прогнозы слоя стока весеннего половодья по уравнению с тремя предикторами на р. Турухан

Предиктор	Год		
	2014	2015	2016
Наивысшие уровни воды за март, см	562	602	521
Максимальная высота снежного покрова за апрель, см	110,3	143,1	98,1
Влажность воздуха за март, %	76	74	77
Слой стока			
Фактическое значение, мм	443	283	219
Прогнозируемое значение, мм	314	357	284
Погрешность, %	29,2	-26,4	-29,9

Таблица 5

Долгосрочные прогнозы слоя стока весеннего половодья по уравнению с четырьмя предикторами на р. Турухан

Предиктор	Год		
	2014	2015	2016
	Погрешность, %		
По трем предикторам	29,2	-26,4	-29,9
По трем предикторам + продолжительность солнечного сияния	29,6	-24,6	-39,7
По трем предикторам + температура на глубине 0,2 м	26,6	-19,1	-41,8
По трем предикторам + средняя высота снежного покрова	29,4	-27,7	-33,9

Уменьшив число предикторов до практического значения и сделав поворотные прогнозы с различными вариантами предикторов, была построена сравнительная гистограмма полученных погрешностей прогнозируемых величин слоев стока весеннего половодья за 2014, 2015 и 2016 гг. (рис. 6).

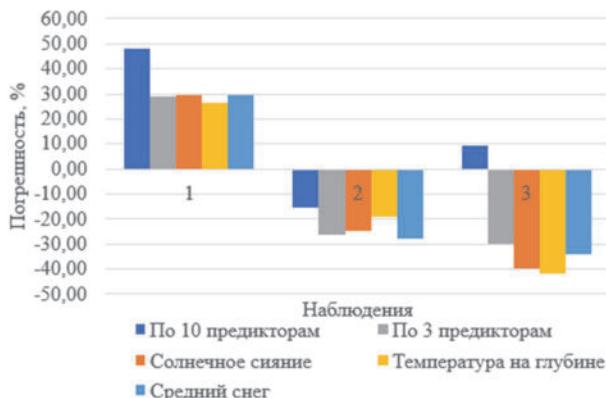


Рис. 6. Сравнение полученных погрешностей прогнозов по уравнению с различным набором предикторов: 1 – 2014 г., 2 – 2015 г., 3 – 2016 г.

Выводы

В результате выявления взаимосвязей между гидрометеорологическими характеристиками и слоем речного стока за весеннее половодье р. Турухан получено, что удовлетворительные результаты поверочных прогнозов достигаются при учете в регрессионном уравнении наивысшего уровня воды, максимальных снегозапасов, влажности воздуха и температуры почвы на глубине 0,2 м. Минимальная заблаговременность прогнозов составляет один месяц, но при определенном наборе предикторов заблаговременность можно увеличить до двух месяцев.

Исследование реализовано при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования, грант № FSZU-2020–0009.

Список литературы

1. Арктическая зона Российской Федерации – состав сухопутной части. URL: <https://ruxpert.ru/> (дата обращения: 30.04.2022).
2. Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы. СПб. : Изд-во РГТМУ, 2007. 436 с.
3. Коваленко В. В., Гайдукова Е. В., Девятов В. С. Фоновое прогнозирование процесса формирования суточных вероятностных стоковых характеристик // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 18. С. 10–20.
4. Турухан // Справочник водных ресурсов. URL: <https://waterresources.ru/> (дата обращения: 23.04.2022).

УДК 543.3

Анализ систем мониторинга на разных уровнях организации в оценке динамики гидрохимических показателей водных объектов и источников загрязнения

Н. В. Кирпичникова (nkirp@list.ru)¹, К. П. Воронина (xenia.voronina2014@mail.ru)², В. О. Хорошевская (vv.z2@yandex.ru)³

¹Институт водных проблем РАН, Москва

²ГУП «Мосводосток», Москва

³Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону

Аннотация. Для различных уровней организации мониторинга предложены методические подходы и комплексный анализ к обработке информационных рядов. Разработана структура многопараметрической электронной базы многолетних данных, сформированы основные блоки природных и антропогенных характеристик водоносов водных объектов. Рассмотрены результаты обработки наблюдений стандартной сети мониторинга и специальных экспериментальных работ.

Ключевые слова: мониторинг, электронная база данных, гидрохимические показатели, источники загрязнения.

Основой водоохранных программ, разработанных по бассейновому принципу, являются многолетние ряды наблюдений метеорологических, гидрологических, гидрохимических, гидробиологических показателей и идентификация основных источников загрязнения. К последним традиционно относят контролируемые точечные и неконтролируемые с диффузным характером поступающих загрязнений. Действующая система государственного гидрохимического и гидробиологического мониторинга позволяет оценить общее экологическое состояние водного объекта, проследить долгопериодические изменения, выявить существующие многолетние тренды, реже внутрисезонные закономерности качества воды и влияние климатических факторов [1].

Наиболее важным аспектом в определении закономерностей является анализ данных мониторинга в многолетней динамике. Причем, для системного анализа и комплексной оценки функционирования водной экосистемы необходимо разработать структуру электронной базы данных. Пример последней был представлен на примере водосбора Иваньковского водохранилища – основного источника водоснабжения г. Москвы (площадь водосбора 41 000 км²) [2]. Продолжительность рядов основных вышеперечисленных параметров составляет 35–50 лет. В первом блоке детально представлена характеристика самого водосбора с позиции административного деления (17 районов, площадь, население). Второй блок – это метеорологические характеристики температуры воздуха и слоя осадков (4 метеорологические станции); третий блок – подробная характеристика гидографической сети (стандартные параметры морфометрии и гидрологического режима).

Четвертый блок – гидрохимические показатели качества воды. Стандартная система наблюдений (Росгидромет, региональные «Водоканалы») базируется на дискретности отбора проб воды один раз в месяц. Пример обработки гидрохимических параметров этого блока (12 проб в год) представлен несколькими водными объектами: Иваньковское, Учинское и Клязьминское водохранилища (входят в Волжскую систему водоснабжения г. Москвы) [3], р. Язу (приток р. Москвы) (рис. 1, 2).

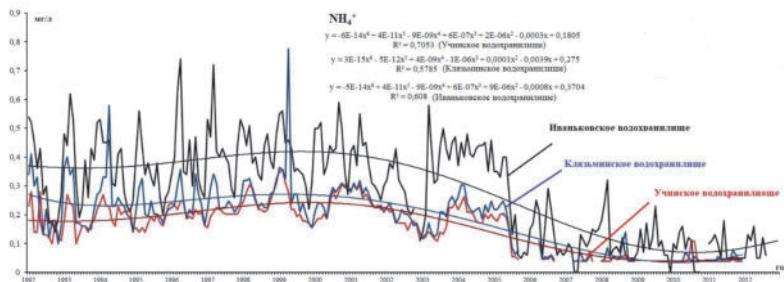


Рис. 1. Среднемесячные концентрации NH_4^+ в Иваньковском, Учинском и Клязьминском водохранилищах и их полиномиальные функции в период наблюдений 1988–2012 гг.

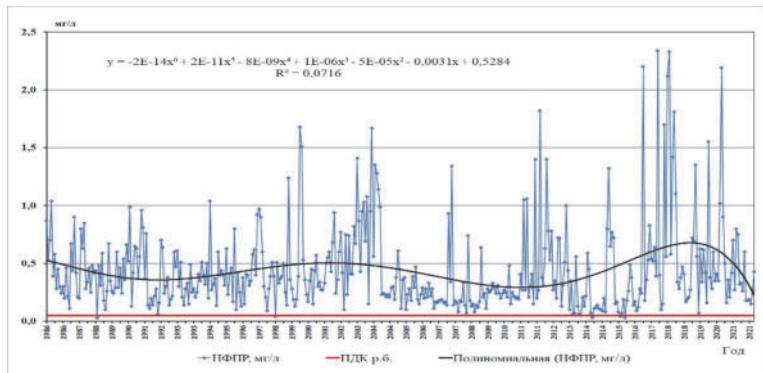


Рис. 2. Среднемесячные концентрации нефтепродуктов (НФПР) в р. Яуза в период наблюдений 1986–2021 гг.

Полиномиальные функции концентраций NH_4^+ водохранилищ Волжской системы водоснабжения показывают, что превышение ПДК_{рб} (0,5 мг/л) наблюдалось в Иваньковском водохранилище до 2003 г., далее концентрации снижаются в трех водохранилищах.

Многолетний ряд концентраций нефтепродуктов в р. Яуза показывает многократное превышение ПДК_{рб} (0,05 мг/л) за весь период наблюдений. Более детальный анализ с внутригодовыми параметрами в комплексном представлении (пример 2018 г.) показывает, что экстремальные значения отмечены в период кратковременных зимних оттепелей и в половодье до середины мая (рис. 3). Как показывают многочисленные экспериментальные исследования по идентификации источников загрязнения, такие высокие концентрации нефтепродуктов характерны для поверхностного смыва с территории городов и промышленных зон [4; 5].

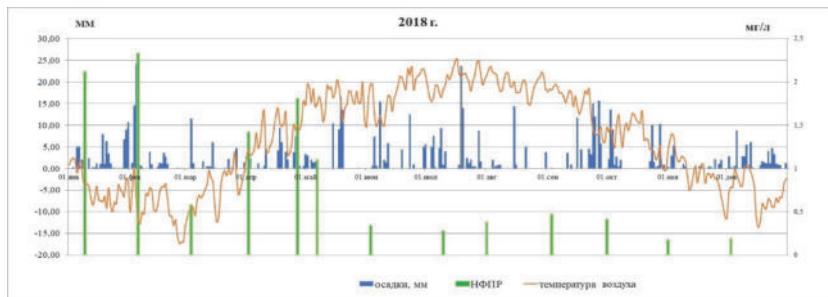


Рис. 3. Внутригодовое распределение температуры воздуха, осадков (метеорологическая станция ВДНХ, г. Москва) и концентраций нефтепродуктов в р. Яуза – устье в 2018 г.

Ежедневный мониторинг метеорологических, гидрологических и гидрохимических показателей позволяют более детальную обработку с обоснованием корреляционных зависимостей и расчетом модулей поверхностного смыва [6].

Дополнительный мониторинг водохранилищ с подробной оцифровкой батиметрии позволяет разрабатывать математические модели с описанием времени дебегания загрязненных водных масс по длине водохранилища при разном уровне режиме и ветровой ситуации [7].

Пятый блок электронной базы данных разработан детально для точечных и диффузных источников загрязнения с многолетними параметрами периода 1986–2019 гг. [8; 9]. К классу точечных источников загрязнения отнесены объемы воды и массы загрязняющих веществ хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод по отчетности 2 ТП-водхоз, пример на рис. 4.

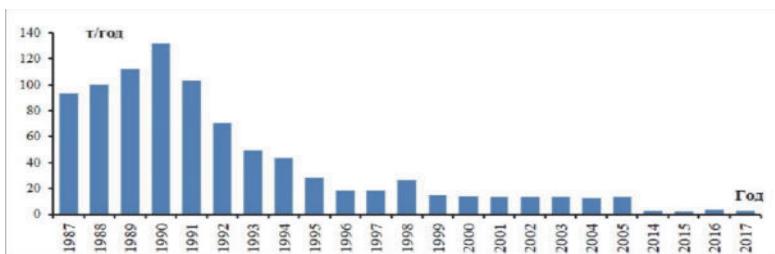


Рис. 4. Массовый сброс нефтепродуктов сточными водами точечных источников загрязнения на водосборе Иваньковского водохранилища за период 1987–2017 гг.

Многолетний мониторинг диффузных (неконтролируемых) источники загрязнения представлен:

- городские территории и промышленные зоны – экспликация по функциональным зонам;
- сельскохозяйственные территории – экспликация сельскохозяйственных угодий (пашни, сенокосы, пастбища); общая масса и дозы вносимых минеральных и органических удобрений; численность животноводства по типам (крупный рогатый скот, свиньи, овцы, козы, лошади, куры); урожайность по типам культур (овощи, зерновые).

Разработанные расчетные методики с использованием всех параметров представленных основных блоков электронной базы данных позволяют провести детальное сопоставление источников загрязнения в многолетнем периоде, разработать ГИС, и в перспективе обосновать первоочередные водоохраные задачи для конкретных водосборов [10]. Для примера на рис. 5 приведено сопоставление источников загрязнения для биогенных элементов (азота и фосфора) по осредненным параметрам разных трехлеток за многолетний период. Следует отметить, что сопоставление и ранжирование источников загрязнения можно проводить и более детально с ежегодным распределением.

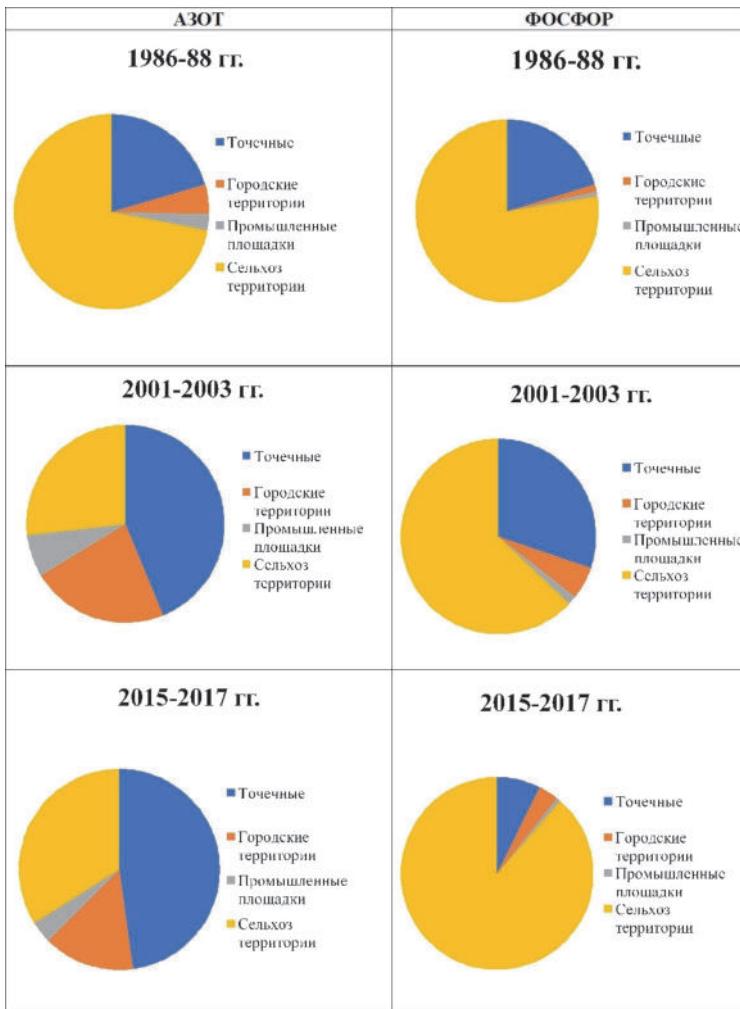


Рис. 5. Сопоставление точечных и диффузных источников загрязнения на водосборе Иваньковского водохранилища за период 1986–2017 гг.

В последние десятилетия для многих водоемов, особенно источников водоснабжения, опасным источником загрязнения становятся береговые зоны, включающие и водоохранные. Разработанный геоэкологический мониторинг Иваньковского водохранилища включал информационную базу на основе топографических карт, спутниковые данные высокого разрешения, детальный мониторинг гидрологических и гидрохимических характеристик боковых притоков.

Ежедневный отбор проб воды проводился также в нескольких створах водохранилища в период интенсивных ливней. Районирование береговой зоны предполагало оценить площадь застройки по удаленности от уреза воды через каждые 150 м (в зоне 0–750 м) и в более укрупненном масштабе в зоне 0–1 км, 1–2 км. Площадные данные дифференцировались по типам застройки: деревни, садоводческие кооперативы, коттеджные поселки, рекреационные зоны. Приведена временная динамика нарастания площадей, выявлены наиболее нагруженные зоны, в основном это коттеджные поселки в зоне 0–300 м от уреза воды и садово-дачные кооперативы в полосе 0–500 м.

Мониторинг гидрохимических параметров выявил значительное увеличение концентраций аммонийного и нитратного азота, БПК₅ в створах водохранилища во время интенсивных дождей [11].

По результатам дешифрирования космических изображений проведено районирование водосборов боковых притоков Иваньковского водохранилища по степени антропогенной нагрузки с выделением ненарушенных (ООПТ, леса, болота), слабо нарушенных (луга, сенокосы, пастбища), интенсивно нарушенных земель (пашни) и определены их площади [12]. По результатам мониторинга гидрологических и гидрохимических показателей боковых притоков проведено районирование по модулям выноса форм азота и фосфора [13]. Пример последних в ГИС приведен на рис. 6.

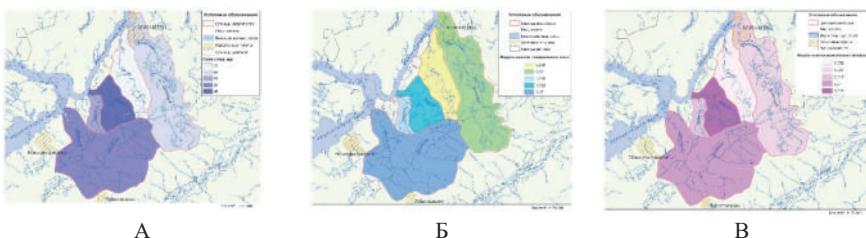


Рис. 6. Районирование водосборов боковых притоков Иваньковского водохранилища по слою стока, мм (А); модулю выноса минерального азота, кг/га (Б); минерального фосфора, кг/га (В) в паводочное лето 1998 г.

Таким образом, можно сформулировать основные выводы:

- мониторинг на разных уровнях организации позволяет разрабатывать методические подходы к анализу данных – многолетние тенденции, корреляционный анализ, математическое моделирование;
- для комплексной оценки процессов природных условий и антропогенной нагрузки водосборов разработана унифицированная структура электронной базы данных за многолетние периоды;
- электронные базы данных мониторинга разных уровней организации включают основные блоки и параметры для детальной характеристики водосборов: административное деление, метеорологические, гидрологические, гидрохимические, источники загрязнения;

– на базе специального мониторинга характерных фрагментов водосбора (городские и сельскохозяйственные территории, промышленные площадки) разработаны расчетные методики, позволяющие проводить сопоставление, ранжирование источников загрязнения, разрабатывать ГИС;

– геоэкологический мониторинг береговых, в том числе и водоохраных зон, позволяет оценить временную динамику антропогенных процессов, выявлять зоны высокой нагрузки, районировать водосборы боковых притоков по уровню выноса биогенных элементов, разрабатывать ГИС, анализировать загрязненность природных вод.

Работа выполнена в соответствии с темой № FMWZ-2022-0002 «Исследования геоэкологических процессов в гидрологических системах суши, формирования качества поверхностных и подземных вод, проблем управления водными ресурсами и водопользованием в условиях изменений климата и антропогенных воздействий» государственного задания ИВП РАН

Список литературы

1. Веницианов Е. В., Кирпичникова Н. В. Мониторинг источников загрязнения водных объектов // Научные основы создания систем мониторинга качества природных поверхностных вод. М. : Научный мир, 2016. С. 183–212.
2. Кирпичникова Н. В., Черненко Ю. Д. Разработка структуры многолетней базы данных к идентификации диффузных источников загрязнения сельскохозяйственных территорий // Материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти Б. И. Яковleva. Респ. Беларусь. Горки, 21–22 апреля 2022 г. С. 101–110.
3. Веницианов Е. В., Кирпичникова Н. В. Оценка состояния качества воды водохранилищ – источников водоснабжения Москвы – по многолетней динамике гидрохимических параметров // Метеорология и гидрология. 2020. № 8. С. 67–76.
4. Гордин И. В., Виницкая И. Е., Кирпичникова Н. В. Идентификация неконтролируемых залывовых поступлений сточных вод в нестационарном потоке // Химия и технология воды. 1990. Т. 12, № 11. С. 967–973.
5. Кирпичникова Н. В., Полянин В. О. Особенности организации мониторинга источников диффузного загрязнения природных вод // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения : сб. тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Нижний Новгород, 2019. С. 389–395.
6. Кирпичникова Н. В. Неконтролируемые источники загрязнения // Иваньковское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны. М. : Наука, 2000. С. 36–62.
7. Веницианов Е. В., Лепихин А. П., Кирпичникова Н. В. Разработка гидродинамической модели и модели распространения загрязнений равнинного водохранилища (на примере Клязьминского водохранилища) // Водное хозяйство России. 2013. № 2. С. 96–107.
8. Кирпичникова Н. В., Черненко Ю. Д. Разработка структуры многолетней базы данных к идентификации диффузных источников загрязнения сельскохозяйственных территорий // Материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти Б. И. Яковleva. Горки, Беларусь. 21–22 апр. 2022 г. С. 101–111.
9. Кирпичникова Н. В. Проблемы организации мониторинга неконтролируемым источниками загрязнения на водосборах водных объектов // Проблемы экологического мониторинга : сб. тр. Всерос. науч. конф. Москва, 20 марта 2017 г. М., 2017. С. 422–424.
10. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения : монография / под науч. ред. В. И. Данилов-Данильян. М. : РАН, 2020. 512 с.
11. Мониторинг застройки водоохраных зон / И. В. Гордин, Н. В. Кирпичникова, Е. И. Куприянова, В. А. Харитонов // Водоохраные зоны: опыт практического применения и целесообразность развития : сб. докл. М., 2006. С. 45–49.
12. Кирпичникова Н. В., Курбатова И. Е. Динамика нарастания неконтролируемой антропогенной нагрузки на береговые зоны источников водоснабжения: разработка методов геоэкологического мониторинга // Водные ресурсы России: современное состояние и управление : сб. докл. Всерос. науч.-практ. конф. Сочи, 8–14 окт. 2018 г. Новороссийск : Лик, 2018. Т. 1. С. 284–291.
13. Критерий для оценки экологического состояния водосборов малых рек и выноса биогенных веществ в Иваньковское водохранилище / Н. В. Кирпичникова, В. О. Полянин, И. Е. Курбатова, Ю. Д. Черненко // Водное хозяйство России. 2021. № 6. С. 81–105.

УДК 551.510.42

Влияние таликов на речной сток в условиях сплошной криолитозоны Центральной Якутии

Л. С. Лебедева (lyudmilaslebedeva@gmail.com)

Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск

Аннотация. Цель исследования – оценить взаимосвязь надмерзлотных субаэральных водоносных таликов с поверхностными водами на примере малого водосбора р. Шестаковки в сплошной криолитозоне Центральной Якутии. Обозначено, что водоносные талики мощностью до 20 м занимают около 20 % водосбора и приурочены к пологим склонам, сложенным песчаными отложениями и покрытыми толокнянковыми редкостойкими сосновыми лесами. Уровень подземных вод в таликах имеет выраженный сезонный ход с наивысшими значениями в период максимального промерзания с января по март и спадом в течение теплого сезона. Водобалансовые расчеты показали, что около 70 % годового стока формируется подземными водами таликов. По гидрохимическим и изотопным данным сделан вывод, что подземные воды таликов поступают в реку в течение летне-осенней межени.

Ключевые слова: талики, речной сток, многолетняя мерзлота, подземные воды, Центральная Якутия.

Введение

Гидрологические и гидрогеологические процессы в области сплошного распространения криолитозоны связаны с существованием сквозных и несквозных водоносных таликов. Воды таликов формируют источники и наледи, участвуют в питании озер и рек. В Центральной Якутии известны субаэральные над- и межмерзлотные водоносные талики на средневозвышенных надпойменных террасах рр. Лена и Вилной и на древней аккумулятивно-денудационной равнине. Они приурочены, как правило, к сухим слабозадернованным песчаным массивам, покрытым редким сосновым лесом. В бассейне р. Шестаковки (20 км к югу от г. Якутска) в зоне вытянутого понижения около оз. Малая Чабыда А. В. Бойцовым было обнаружено четыре талика площадью от единиц до нескольких десятков тысяч квадратных метров и мощностью водоносного слоя в весенне-зимний период до 3–4 м [3]. В 1977 г. здесь был организован научный стационар, на котором в течение 8 лет проводился комплекс мерзлотно-гидрогеологических исследований коллективами лаборатории подземных вод и теплобалансовой группы Института мерзлотоведения (ИМЗ) СО АН. В 2016 г. были инициированы мерзлотно-гидрогеологические, геофизические и гидрометеорологические наблюдения на участке распространения надмерзлотного талика в верховьях р. Левая Шестаковка примерно в 5 км к западу от оз. Малая Чабыда.

Распространение субаэральных таликов в условиях сплошной криолитозоны и их участие в питании рек остается дискуссионным вопросом. Исследования субаэральных таликов становятся особенно актуальными для оценки эволюции мерзлотно-гидрогеологических условий региона при меняющемся климате. Целью работы было оценить распространение и динамику надмерзлотных водоносных таликов и их взаимосвязь с поверхностными водами на примере

малого исследовательского водосбора р. Шестаковки в сплошной криолитозоне Центральной Якутии.

Материалы и методы

На водосборе р. Шестаковки организован автоматизированный мониторинг за метеорологическими параметрами, температурой горных пород, уровнями воды рек, озер и водоносных таликов. Регулярно проводятся измерения расходов воды на двух замыкающих створах и отбор проб осадков, рек, озер и водоносных таликов для анализа химического и изотопного состава воды. Используются методы геофизики (георадиолокация и электротомография), трассерной гидрологии, выполняется бурение и оборудование термометрических и гидрогеологических скважин. Помимо результатов собственных полевых исследований в анализе использовались данные с метеорологической станции г. Якутск и с гидрологического поста р. Шестаковка-Камырдагыстах государственной сети Росгидромет.

Объекты исследования

Водосбор р. Шестаковка площадью около 170 кв. км располагается на левом берегу р. Лены в 20 км к югу от Якутска в зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты мощностью 200–400 м. Климат района исследования резко континентальный с суровой продолжительной зимой и коротким жарким летом. Средняя годовая температура воздуха на ближайшей метеорологической станции в г. Якутске за период 1920–2019 гг. составляет минус 9,5°C, средняя многолетняя температура января минус 40,5°C, июля плюс 19,1°C. Среднее годовое количество осадков с 1937 по 2015 г. 268 мм/год, из них жидких – 160 мм/год, смешанных – 8 мм/год и твердых – 100 мм/год. Среднемноголетнее значение слоя стока равно 25 мм/год.

В распадках, понижениях и на выровненных участках рельефа произрастают лиственнично-березовые леса. Сосновые леса занимают преимущественно склоны и водоразделы. Вдоль ручьев и озер развиты мари и заболоченные территории. Сосновые леса занимают 47 % площади водосбора р. Шестаковки, лиственнично-березовые леса – 38 %, мари и болота – 14 % и озера – 1 %.

Верхнюю часть геологического разреза до глубины 30 м слагают рыхлые песчаные отложения с редкими прослойками глин [3]. На склонах и водоразделах пески представлены мелко- и среднезернистыми фракциями. Их объемная влажность в зоне аэрации не превышает 2–8 %. Песчаные отложения имеют кварц-полевошпатовый состав, плотность скелета более 1,70 г/см³ и пористость 33–35 % [2]. В днищах долин ручьев и распадков увлажненные (15–25 %) пески покрыты органогенным слоем.

Рассматриваемая территория относится к области развития нестационарных мерзлых толщ, мощность которых в современный период достигает 400–500 м. Температура пород на глубине 100 м составляет –0,6...–1,0 °C [3], а на подошве слоя нулевых годовых амплитуд в зависимости от ландшафта изменя-

ется от положительных (близких к 0 °C) значений до –2...–3 °C и ниже. Мощность сезонно-талого слоя (СТС) изменяется от 4 м на пологих склонах и водоизделах, покрытых сосновым лесом, до 0,5 м на марях.

Результаты

Результаты бурения и геотермических наблюдений. На водосборе р. Шестаковка при относительно едином метеорологическом фоне геотермические условия различны. Кровля многолетней мерзлоты залегает на глубинах от 0,5 до 20 м. Верхняя часть геологического разреза находится как в сезонномерзлом, так и в сезонноталом состоянии, в зависимости от состава и свойств отложений. Самые высокие температуры пород характерны для площади распространения водоносных надмерзлотных таликов, которые приурочены к пологим склонам, сложенным песчаными отложениями и покрытым редким сосновым лесом. На таких участках мощность сезонно-мерзлого слоя (СМС) достигает 3 м, а глубина нулевых годовых амплитуд варьируется от 6 до 12 м. Талые породы сохраняются за счет постоянной фильтрации подземных вод в них. Присутствие в разрезе отложений с более низкими фильтрационными свойствами (супеси и суглинки) не благоприятствуют существованию талика.

На ключевом участке Левая Шестаковка надмерзлотный субаэральный водоносный талик имеет ширину 180–200 м и протяженность около 900 м. По результатам геофизических исследований, талик имеет сложный контур и несколько водопроводящих рукавов, а его мощность изменяется от 3 до 20 м [4]. На участке Чабыда А.В. Бойцов исследовал надмерзлотный субаэральный водоносный талик длиной 500 м, шириной 120 м и максимальной мощностью 4 м. Такие талики приурочены к пологим склонам, сложенным песчаными отложениями и покрытыми толокнянковыми редкостойными сосновыми лесами.

Результаты геофизических исследований. Оценка распространения надмерзлотных таликов в бассейне р. Шестаковки была проведена методом ключевых участков с помощью георадиолокации. В пределах распространения соснового леса и песчаных отложений были выбраны 15 ключевых участков в различных орографических и геоморфологических условиях с целью идентификации таликовых зон. На каждом из 15 участков в мае 2017 г. была выполнена георадарная съемка по профилю длиной 300 м. Были выявлены талики на 7 профилях из 15. Талые породы характеризуются протяженностью от десятков до сотен метров и мощностью от 1 до 20 м. Исходя из предположения, что 15 ключевых участков являются репрезентативными для сосновых лесов водосбора, можно сделать вывод, что надмерзлотные водоносные субаэральные талики занимают около 20 % площади водосбора р. Шестаковки, что намного превышает значение коэффициента таликовости территории из литературных данных.

Результаты гидрогеологических наблюдений. Уровень подземных вод в таликах имеет выраженный сезонный ход и связан как с температурой пород, так и с выпадением атмосферных осадков. Уровни таликовых вод, температура воздуха, осадки и расход воды на гидрологическом посту Шестаковка – Камырдагистах за 2015–2020 гг. показаны на рис. 1.

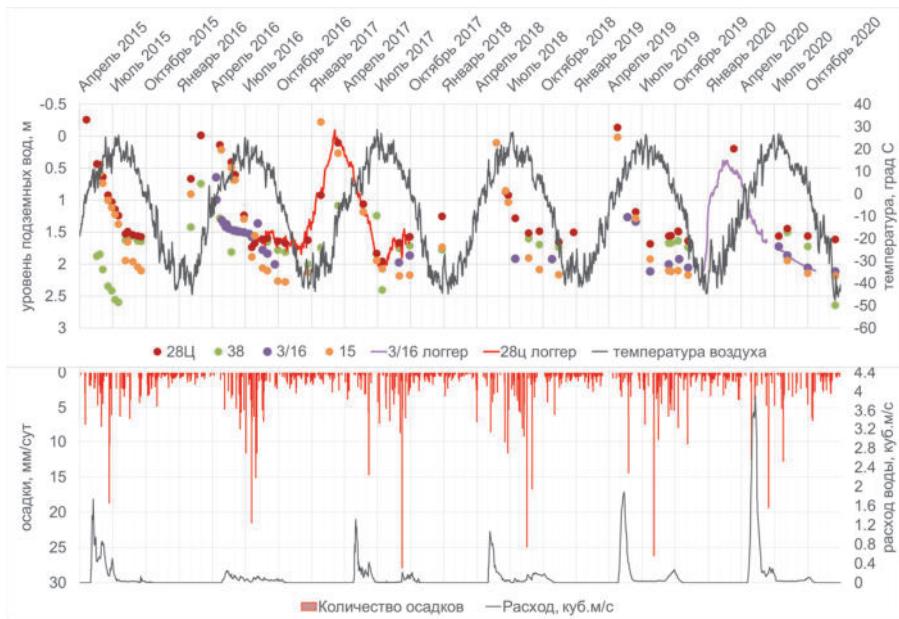


Рис. 1. Ход уровня (от поверхности земли) подземных вод таликов в гидрологических скважинах, температура воздуха, количество осадков и расход воды р. Шестаковка – Камырдагыстах. Ручные измерения показаны точками, автоматические – линией

Уровень подземных вод в талике колеблется в течение года с амплитудой 1,5–2,5 м. Минимальные уровни в течение года наблюдаются, как правило, в конце теплого сезона – в сентябре и октябре, а максимальные – с января по апрель. Повышение уровня таликовых вод в течение холодного сезона происходит за счет промерзания пород сверху и формирования криогенного напора в водоносном горизонте. В отдельные зимы (2015, 2017 и 2019) уровень таликовых вод устанавливается выше земной поверхности за счет криогенного напора. Относительно редкие ручные наблюдения не позволяют судить о влиянии выпадения атмосферных осадков на уровень подземных вод талика. По автоматическим измерениям уровня видно, что значительные по объему (более 10–15 мм/сут) летние осадки приводят к кратковременному подъему уровня подземных вод талика на 0,2–0,4 м. Дожди менее 5–10 мм/сут не отражаются на ходе уровня подземных вод талика.

Водный баланс водосбора. Приходной составляющей водного баланса р.Шестаковки являются жидкие и твердые атмосферные осадки, расходными компонентами – испарение со снега, с почвы, транспирация и речной сток. Круглогодично действующими емкостями являются озера и надмерзлотные талики. Сезонно действующими емкостями являются снежный покров и воды СТС.

Осадки за гидрологический год за период 1950–2018 гг. на метеостанции Якутск варьируются от 128 (2000–2001) до 342 (2005–2006) мм со среднемноголетним значением, равным 240 мм/год. Жидкие осадки меняются от 87 до 269 мм/год, составляя в среднем 69 % (165 мм) от общего количества осадков. Твердые осадки варьируются от 41 до 113 мм. На них приходится 31 % (75 мм) общего количества осадков. По данным снегомерных съемок в лесу по метеостанции Якутск с 1965 по 2011 г. максимальный запас воды в снежном покрове приходится на конец марта или начало апреля и варьируется от 33 до 88 мм со среднемноголетним значением 58 мм. Разница между максимальными за год снегозапасами и суммой твердых осадков составляет от -7 (превышение снегозапасов над осадками) до 33 мм со средним значением 16 мм. Снегомерная съемка может проводиться до выпадения последних твердых осадков и после потерь снега на таяние и испарение. В конце марта и начале апреля происходит интенсивное испарение и частичное таяние снега в солнечные дни даже при отрицательной температуре воздуха, и наблюдается выпадение снега. Снегозапасы, фиксируемые снегомерной съемкой, с высокой вероятностью будут ниже суммы твердых осадков. В Центральной Якутии испарение со снега играет существенную роль в водном балансе. Экспериментальные данные А. Л. Арэ [1] показали, что испарение со снега варьируется от 3 до 20 мм за год и в среднем составляет около 13 мм на открытых участках и 6 мм – под кроной леса. В первой половине зимы испарение со снега ничтожно и может преобладать процесс конденсации. Наиболее интенсивно испарение происходит в марте, апреле и мае.

При снеготаянии в сосновом лесу практически никогда не наблюдается поверхности сток. За несколько лет работы стоковой площадки на Чабыдинском полигоне А.В. Бойцовым [2] поверхностный сток был зафиксирован всего несколько раз в ничтожном количестве, в том числе 8 июня 1984 г. после выпадения месячной нормы осадков (31,8 мм) за один день. 9 июня 1984 г. наблюдался исторический максимум расхода воды в замыкающем посту р. Шестаковка – Камырдагыстах. По наблюдениям А. В. Бойцова [3] в период таяния снега талые воды легко проникают в мерзлые пористые пески на участках распространения сосновых лесов. В лиственнично-березовых лесах и марях талые воды не могут фильтроваться в льдонасыщенные мерзлые породы и при наличии уклона образуется сток в приповерхностном органическом слое. Летом по мере протаивания почвы приповерхностный сток не наблюдается в лиственнично-березовых лесах. В зависимости от осадков ручьи на мари могут функционировать или полностью пересыхать в течение летнего сезона.

Даже в самые сухие периоды нижняя часть СТС в лиственнично-березовых лесах, марях и болотах под плотной моховой подушкой насыщена водой до состояния полной влагоемкости. На заболоченных и задернованных участках формируются обычно небольшие по площади маломощные линзы и узкие потоки надмерзлотных вод СТС [3]. В отличие от лиственнично-березовых лесов, марей и болот СТС в сосновых лесах не достигает полного водонасыщения, а до глубины 1 м находится, как правило, в иссушенном состоянии при влажности менее 5 %.

По оценкам А. В. Бойцова [3], подземный сток Чабыдинского талика составляет в среднем 80–90 мм за теплый сезон. Допуская, что эта оценка representative для других таликов в бассейне р. Шестаковки и оценивая площадь таликов в 34 км² (20 % площади водосбора), доля подземного питания реки таликовыми водами составляет 68 %. Оставшиеся 80 % водосбора, покрытые сосновыми лесами без таликов, лиственнично-березовыми лесами, марями и болотами дают всего 32 % стока реки или 10 мм/год. Это сравнимо с речным стоком других водосборов в Центральной Якутии, где, предположительно, надмерзлотные водоносные талики не имеют широкого распространения. Так, средний многолетний сток рек Таатта, Суола и Танда составляет 1, 15 и 8 мм/год соответственно [5].

Испарение в лесах Центральной Якутии оценивается от 140 до 260 мм/год [6]. На марях и в лиственнично-березовых лесах испарение практически равно количеству атмосферных осадков. В сосновых лесах разница между осадками и эвапотранспирацией составляет от 80–100 мм до 130–140 мм.

Слой стока р. Шестаковки за гидрологический год варьируется от 1,5 до 99 мм. Среднемноголетнее значение слоя стока равен 25 мм/год. Коэффициент стока меняется от 1 до 36 %, в среднем составляя 10 %. В среднем половина стока реки проходит за период половодья – апрель и май. Год от года доля половодья в годовом стоке варьируется в широких пределах от 3 до 82 %.

Формирование стока р. Шестаковки. По-видимому, различные ландшафты дают вклад в сток р. Шестаковки в разные сезоны года. При снеготаянии талая вода в сосновых лесах частично испаряется, фильтруется в мерзлые слабольдистые песчаные отложения и не доходит до реки на подъеме и пике половодья. Талая вода на марях и в лиственнично-березовых лесах, в отличие от сосновых лесов, стекает по поверхности в реку и образует сток половодья р. Шестаковки. На спаде половодья в течение лета вода СТС лиственнично-березовых лесов и марей расходуется на испарение и транспирацию и не дает вклада в сток реки. В сосновых лесах потери на испарение и транспирацию (102–114 мм) меньше, чем на марях (244 мм) и лиственничниках (214 мм). Даже в засушливые годы питание зоны аэрации, расходуемое в дальнейшем на подземный, речной сток и транспирацию влаги древостоем, превышает величину испарения с поверхности почвы. Водоносный слой появляется в хорошо проникаемых песчаных отложениях на пологих склонах. В случае зарастания склона вся влага расходуется на испарение и транспирацию. Надмерзлотный сток СТС и таликов сосновых лесов преобладает в речном стоке летнего периода (за исключением периода половодья). Это подтверждается повышенной цветностью и кислотностью воды в реке в начале половодья, что говорит о значительной роли марей и болот. В течение летнего периода цветность и pH речной воды ближе к таликовым водам.

На рис. 2 видно, что во время половодья 2020 г. и в верхнем (пост Верхний), и в нижнем течении (пост Камырдагыстах) температура воды держалась около 0°C, а минерализация воды составляла 30–40 мг/л. Это близко к минерализации снега, которая весной 2020 г. по результатам анализа пяти проб, распределенных по водосбору, была равна от 5 до 15 мг/л. Минерализация воды ручьев

на мари, по которым во время половодья талая вода попадает со склонов водосбора в русло, варьировалась от 16 до 32 мг/л (6 проб). На спаде половодья во второй половине мая вода в русле прогревается, и минерализация повышается до 45–55 мг/л. До второй половины июня минерализация и температура воды в верхнем течении выше, чем в нижнем, т. е. вниз по течению происходит постепенное разбавление холодными и распесненными талыми водами, источниками которых могут быть остатки снега, наледи и лед СТС. В конце июня и начале июля водосбор переходит в состояние межени, ручьи на мари пересыхают, уровень воды опускается до минимальных отметок, температура воды достигает 15 °C, минерализация – 55–60 мг/л. Одновременно с этим происходит смена соотношения параметров воды в верхнем и нижнем течении. В межень температура и минерализация воды несколько увеличиваются вниз по течению. Минерализация воды растет на 5–10 мг/л, температура – на 1–5°C от поста Верхний к замыкающему створу Камырдагыстах. Мы предполагаем, что рост минерализации как в течение лета, так и вниз по течению реки связан с увеличением доли питания подземными водами таликов и глубокого СТС в сосновых лесах. Это подтверждается тем, что минерализация таликовых вод летом 2020 г. на участке Верхняя Шестаковка составляла от 68 до 83 мг/л.

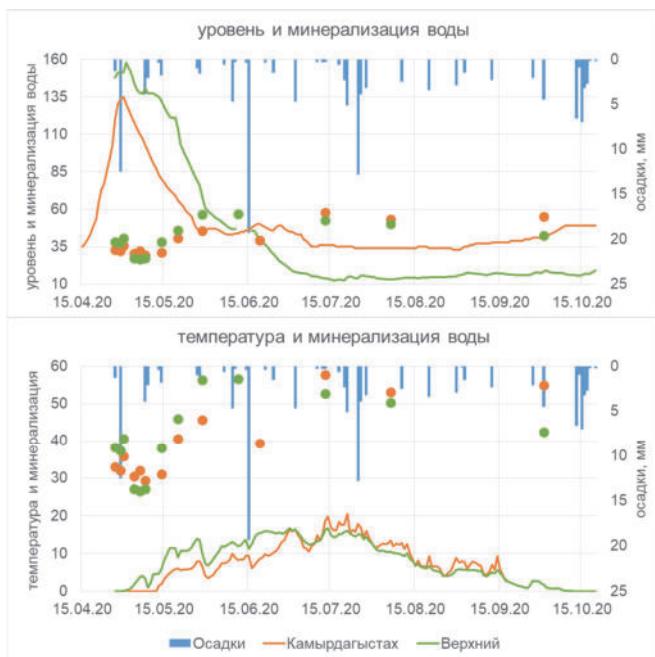


Рис. 2. Сверху: ход уровня (линии) и минерализации (точки) воды; снизу: ход температуры (линии) и минерализации (точки) воды в верхнем (пост Верхний) и нижнем (пост Камырдагыстах) течении р. Шестаковка

Заключение

В условиях сплошной многолетней мерзлоты на водосборе р. Шестаковка надмерзлотные водоносные талики мощностью до 20 м занимают около 20 % территории, что на порядок превышает значение коэффициента таликовости территории. Талики приурочены к пологим склонам, сложенным песчаными отложениями и покрытыми толокнянковыми редкостойными сосновыми лесами. Уровень подземных вод в таликах имеет выраженный сезонный ход с наивысшими значениями в период максимального промерзания и спадом в течение теплого сезона. Доля подземного питания реки таликовыми водами составляет 68 %. 80 % водосбора, покрытые сосновыми лесами без таликов, лиственнично-березовыми лесами, марями и болотами дают всего 32 % стока реки или 10 мм/год. На подъеме половодья сток формируется преимущественно на марях и лиственнично-березовых лесах, где талые воды стекают по кровле мерзлого стоя в органогенном горизонте в реку. На спаде половодья и в течение летне-осенней межени преобладает сток, сформированный подземными водами таликов и СТС в сосновых лесах, что подтверждается сезонным ходом минерализации воды в реке, ручье на мари и таликах.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-17-20040 «Субаэральные и подозерные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

Список литературы

1. Арз А. Л. Снежный покров Центральной Якутии, особенности его радиационного и гидротермического режима // Теплообмен в мерзлотных ландшафтах. Якутск : ИМЗ СО АН СССР, 1978. С. 30–42.
2. Бойцов А. В. Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии : дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Якутск : Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. 176 с.
3. Бойцов А. В. Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. Якутск : Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1985. С. 44–55.
4. Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) / Л. С. Лебедева, К. И. Бажин, И. И. Христофоров, А. А. Абрамов, Н. А. Павлова, В. С. Ефремов, В. О. Огонеров, А. М. Тарбеева, М. П. Федоров, Н. В. Нестерова, О. М. Макарьева // Кriosfera Zemli. 2019. № 1. С. 40–50. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50))
5. Лебедева Л. С., Макарьева О. М. Факторы пространственной изменчивости речного стока в Центральной Якутии // Известия РАН. Серия географическая. 2020. Т. 84, № 5. С. 776–785. <https://doi.org/10.31857/S258755662005009X>
6. Interannual variation of water balance and summer evapotranspiration in an eastern Siberian larch forest over a 7-year period (1998–2006) / Ohta T., Maximov T. Chr., Dolman A. J., Nakai T., van der Molen M.K., Kononov A.V., Maximov A.P., Hiyama T., Iijima Y., Moors E. J., Tanaka H., Toba T., Yabuki H. // Agric. for. meteorol. 2008. Vol. 148, N 12. P. 1941–1953

УДК 504.03:711.4(556)

Водные объекты как каркас устойчивого развития населенных пунктов

Е. В. Потапова (e.v.potapova.isu@mail.ru), А. И. Михалева, А. А. Копылова

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Отмечено, что значительная часть населения находится в границах проявления опасностей, поэтому формирование стабильного природно-экологического каркаса населенного пункта позволит оптимизировать устойчивое развитие поселений. Важная роль в этом отведена водным объектам и водоохранным зонам. Обозначены их экосистемные функции и некоторые специальные аспекты при генеральном планировании.

Ключевые слова: цели устойчивого развития, населенные пункты, водные объекты, ООН, безопасность.

Многие последствия изменения климата – это уже реальность, их трудно предотвратить, но с ними нужно научиться жить, к ним можно и необходимо адаптироваться. ООН призывает вкладывать больше средств в планы и проекты по адаптации к последствиям глобального потепления. Несмотря на значительное число научных и практических наработок, существующих и разрабатывающихся методик, помимо различных способов от перехода к выращиванию других видов сельскохозяйственной продукции в новых условиях, до снижения температуры в городах, путем озеленения фасадов и покрытия домов белыми крышами и садами, сооружения дорог и мостов, таким образом, чтобы они выдерживали более высокие температурные и ветровые нагрузки, глобальные усилия по адаптации к стихийным природным бедствиям не успевают за растущими климатическими рисками [1].

Оптимизация природно-экологического каркаса территории, как основы создания благоприятных условий среды жизнедеятельности человека, рационального использования природных ресурсов и охраны уникальных природных территорий, сохранившихся в границах населенного пункта – важнейшие задачи территориального и генерального планирования. Разработка каркаса особенно важна для муниципальных образований, обладающих высокой степенью напряженности экологических конфликтов на территории (например, между крупными производствами с объемными выбросами и сбросами в окружающую среду) и значительной степенью дополнительной нарушенности территории (например, наличие объектов накопленного вреда – завершивших функционирование промышленных производств, очагов повышенного фонового загрязнения среды).

Каждый водный объект – это уникальная природная и/или природно-антропогенная система, обладающая специфическими гидрологическими и экологическими характеристиками, выполняющая задачи по обеспечению населения экосистемными услугами. Особое место они занимают в поселениях, особенно

крупных. Именно в границах населенных пунктов экосистемные услуги расширяют свои возможности, так как предоставляют их непосредственно людям – жителям, особенно маломобильным группам – инвалидам, пожилым и родителям с детьми. Компонентно-организационная структура сообществ берегов водоемов, водотоков в составе водоохранной зоны представляет собой многолетнюю смесь использования этих территорий [2]. Несмотря на их значимость, за счет свободного доступного пространства, требуемого законодательством РФ в границах прибрежных защитных полос, они, зачастую, заняты застройкой, в том числе переулотненной и расположенной в непосредственной близости от уреза воды, дорогами различного назначения, стоянками автотранспорта и другими объектами инфраструктуры, несоответствующими требованиям защиты поверхностных вод. Многочисленные промышленные объекты исторически располагались на берегах водоемов и водотоков, тем самым нанося серьезный урон водным объектам, который распространяется на всем его протяжение. Последние два десятилетия привели к сокращению числа предприятий на территориях населенных пунктов, но восстановление, а часто ревитализация их земельных участков далеко не завершена, что дает возможность использовать их для формирования особых территориальных условий – экологических мостов, переходов с организацией связи с пригородными пространствами.

Каркасформирующая роль водных объектов и их водоохраных зон, как базы для адаптации поселений к проявлению природных и антропогенно обусловленных опасностей, базируется на следующих экосистемных функциях:

1. Средообразование как окружающих территорий, но и всего населенного пункта.
2. Глобальные услуги в виде производство кислорода, регулирование климата, участие в круговоротах веществ и воды.
3. Ресурсные услуги обеспечивают жителей не просто пищевыми и энергетическими ресурсами, но генетическими и минеральными.
4. Экологическая группа услуг регулирует качество всех сред и изменяет экологические факторы, влияя на водный, воздушный и радиационный режим поселения.
5. Санитарно-гигиенические услуги – формально самая значимая группа для водных объектов, обеспечивает необходимое качество окружающей среды, соответствующее некоторым нормам, как фильтра для воздуха и вод, особенно дождевых, защиты от шума и сохранение почвенного слоя.
6. Медико-социальные услуги предоставляют услуги непосредственно жителям – обеспечивая рекреацию, влияя на органы дыхания, центральную нервную систему, создавая определенное настроение и повышение жизненного тонуса, формируют гетерогенные, неагрессивные поверхности, улучшающие фиксацию взгляда при автоматии саккад.
7. Декоративно-планировочные – определяют формирование городского ландшафта, позволяют создать неповторимый облик населенного пункта.
8. Научно-познавательные услуги обеспечивают возможность общения с природой (особенно детей, пожилых, инвалидов), являются объектами изучения

или системой знаний, выполняют биоиндикаторную функцию показателя состояния среды.

Гуманизация пространства населенных пунктов за счет сглаживания ландшафта, высотности домов, расширения области обзора – это лишь незначительная часть назначений водных объектов [3].

При генеральном планировании развития муниципальных образований, в том числе в рамках территориального планирования, первостепенно следует учитывать расположение водных объектов и их непосредственную связь с пригородными экосистемами, возможность формировать зеленые коридоры, чрезвычайно необходимые в случаях проявления катастрофических событий. Создавая социально значимый природно-экономический каркас населенного пункта должны быть учтены следующие аспекты:

- осознание важнейшей роли воды, водных пространств, водных объектов и водоохранных зон в границах населенных пунктов, в контексте изменения климата, нарастания катастрофических явлений, стабильное ухудшения качества вод и прямую нехватку их на Земле, преимущественно ввиду загрязнения и засорения водных объектов.

- недопущение бесконтрольного расширения границ поселений за счет застройки защитных зеленых зон.

- использование незастроенных участков и различных санитарных разрывов (санитарно-защитных, водоохранных зон и др.) для создания дополнительных эколого-рекреационных зон.

- обеспечение населения необходимой долей насаждений для поддержания здоровой и безопасной окружающей среды проживания.

- пятнадцатиминутная доступность крупных объектов озеленения общего пользования каждому жителю.

- полная открытость прибрежных защитных полос, например в соответствии с законодательством РФ.

- особые инновационные подходы к организации, использованию и развитию водоохранных зон.

- усиление социальной значимости пространств поселений и гуманизация их территорий.

- ревитализация пространств населенных пунктов, в частности крупных городов, с учетом нарастания и усиления климатических и экологических опасностей.

- увеличение достижимых показателей жизнеспособности территории, в том числе за счет информирования населения о эффективном использовании пространств и размещения насаждений.

Каждая из 17 выполняемых Целей устойчивого развития до 2030 г. так или иначе касается обеспечения безопасности и продолжения оптимального функционирования населенных пунктов во время и по окончании различных катастроф антропогенного и природного происхождения. Водные объекты на территориях поселений, особенно крупных, являются как причиной происхождения значительного числа опасностей, так и необходимым источником решения многих

проблем, в том числе в обыденной жизни людей. Изменение климата наносит человечеству удар за ударом, и если не принять меры, к 2050 г. более 5 млрд человек будут испытывать проблемы с водой. Об этом свидетельствуют события, происходящие на протяжении всего 2022 г. и призывы времени, что глобальное потепление – серьезная угроза здоровью, предотвращение изменения климата уменьшит смертность людей в трети стран «большой двадцатки», система раннего предупреждения о надвигающихся катастрофах должна быть комплексной и эффективной, однако борьбу с изменением климата необходимо вести с учетом прав человека и многие другие [4]. Климатические изменения привели к осознанию, что значительная часть населения находится в границах проявления опасностей, поэтому формирование стабильного природно-экологического каркаса населенного пункта позволит оптимизировать устойчивое развитие поселений, особенно их водных объектов.

Список литературы

1. Новости ООН. URL: <https://news.un.org/ru/story/2022/11/1434287> (дата обращения: 01.11.2022)
2. Потапова Е. В. Гилазова А. Ф. Компонентно-организационная структура растительных сообществ прирусловой территории рек г. Иркутска // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2012. № 1 (5). С. 224–235.
3. RESTORE: encourages the restoration of European rivers towards a more natural state for increased ecological quality, flood risk reduction, and social and economic benefits. URL: <http://www.restorerivers.eu> (дата обращения: 01.11.2022)
4. Климат и окружающая среда. URL: <https://news.un.org/ru/news/topic/climate-change> (дата обращения: 01.11.2022)

УДК 551.588.4+556.55

Поток метана с поверхности boreальных озер европейского севера России

С. Д. Прасолов (sergeyprasolov1@gmail.com)¹, С. А. Забелина¹, С. И. Климов¹,
А. В. Чупаков¹, О. С. Покровский^{1,2}

¹ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН, Архангельск

²Geoscience and Environment Toulouse, CNRS, University of Toulouse, IRD, Toulouse, France

Аннотация. Представлены результаты исследования потоков метана из пяти контрастных boreальных озер европейского севера России с целью получения данных об объемах эмиссий с их поверхности. Исследования проводились на озерах, контрастным по своим размерам, морфометрическим и гидрохимическим характеристикам, потоки рассчитывались с использованием эмпирических моделей и концентрации метана в пробах воды. Полученные результаты указывают на важность дальнейшего и более детального изучения пространственно-временной изменчивости потоков парниковых газов с поверхности озер, сбора большего количества данных прямых наблюдений и выявления неопределенностей, связанных с использованием различных эмпирических моделей при расчетах.

Ключевые слова: Архангельская область, парниковые газы, озера, эмиссия углерода, метан.

Введение

Метан (CH_4) имеет важную климатическую роль, обладая потенциалом парникового газа (ПГ), более чем в 20 раз превышающим таковой для углекислого газа [1]. Исследования последних десятилетий показали важную роль озер в биогеохимическом цикле углерода (С). Озера вносят значительный вклад в общий объем эмиссий С в атмосферу, в отдельных случаях сравнимый со способностью окружающих ландшафтов к его поглощению [9], что делает изучение эмиссии CH_4 из пресноводных экосистем актуальным в контексте глобального изменения климата. Потоки ПГ из озер европейского севера России являются малоизученными, что не позволяет корректно оценить их региональные эмиссии в атмосферу. Существует нехватка достоверных данных о сезонной, межгодовой и пространственной изменчивости потоков ПГ с поверхности водоемов.

В настоящей работе представлены результаты исследований эмиссии метана с поверхности контрастных boreальных озер в весенний период. Целью исследования было получение данных об объемах эмиссий парниковых газов с поверхности озер европейского севера России.

Материалы и методы

Исследования проводились на примере озер Иласское, Мудьюгское, Светлое, Северное и Темное Архангельской области (рис. 1), отличающихся контрастными морфометрией и гидрохимическими характеристиками. По показателю открытости (отношение площади водоема к его средней глубине) большинство исследуемых озер относятся к слабо открытым ($< 0,1$), оз. Иласское – к открытым водоемам ($0,51\text{--}5,0$).

Озера Иласское и Северное расположены в Иласском болотном массиве, в 20 км к югу от Архангельска. Озеро Северное находится в грядово-озерковом комплексе в северной части болота, площадь зеркала – $0,013 \text{ км}^2$, глубина – $\approx 2,2$ м. Озеро характеризуется низкими значениями pH (3,9–4,8) и электропроводности (18–40 мкСм), прозрачность по диску Секки – до 2 м. Озеро Иласское расположено в центральной возвышенной части болота. Площадь зеркала озера – $1,8 \text{ км}^2$, средняя глубина – 1,6 м [3]; pH 4,7–5,5; электропроводность – 12–46 мкСм; прозрачность воды по диску Секки – 1,5 м.

Озера Мудьюгское и Светлое прозрачные, вытянутой формы, длиной около 500 и 900 м соответственно, расположены в 65 км северо-восточнее Архангельска. Озеро Мудьюгское – первое в системе озер р. Мудьюга. Площадь зеркала – $0,043 \text{ км}^2$, глубина – 11 м; pH 7,6–8,7; электропроводность – 167–280 мкСм; прозрачность по диску Секки – до 6 м. Озеро Светлое (глубина – 39 м) является первым в системе озер, дающих начало р. Светлой; площадь зеркала озера – $0,146 \text{ км}^2$. Прозрачность воды по диску Секки – до 12 м; pH 7,1–7,7; электропроводность – 217–350 мкСм [2; 4].

Озеро Темное расположено в 50 км к востоку от Архангельска, значительную долю в водосборе составляют болота, из-за чего озеро богато органическими веществами; площадь зеркала – $0,09 \text{ км}^2$; прозрачность по диску Секки – 3,5 м; pH 5,4–6,2; электропроводность – 22,4–35,8 мкСм [3]. Озера Светлое и Темное

являются меромиктическими, для обоих характерно наличие анаэробной зоны. В оз. Светлом наблюдаются аномально высокие концентрации метана, запас монимолимнионе оценивается около 2,5 т [2], в то время как в оз. Темном – около 20 кг.



Рис. 1. Карта-схема объектов исследования

В настоящей работе рассматриваются потоки за май 2022 г., так как считается, что после таяния льда эмиссии парниковых газов с поверхности озер достигают максимальных значений. Для расчета диффузионного потока метана пробы воды на каждом озере отбирались с глубины 1 м, в трех точках в разных частях акватории, отличающиеся также морфометрией и/или биотопами.

Одновременно с отбором проб проводилось измерение температуры воды, концентрации растворенного кислорода, электропроводности и pH в поверхностном слое. Определение концентраций парниковых газов проводилось на лабораторном газовом хроматографе «Хроматэк – Кристалл 5000» с пламенно-ионизационным детектором. Для каждой точки пробоотбора были получены концентрации CH₄ в поверхностном слое, из которых в дальнейшем были рассчитаны диффузионные потоки и общая эмиссия со всей площади озера.

Диффузионные потоки были получены с использованием пленочной модели приграничного слоя (boundary layer model) [11], рассматривающей границу раздела сред как двуслойную систему из поверхностного слоя жидкости и приповерхностного слоя газа, в виде пленок, между которыми устанавливается пологовесие. Газообмен между слоями, согласно первому закону Фика, зависит от градиента концентраций и описывается уравнением:

$$F = k(C_{\text{sur}} - C_{\text{eq}}), \quad (1)$$

где k – скорость переноса газа (см/час), C_{su} – измеренная концентрация в поверхностном слое воды и C_{eq} – концентрация в поверхностном слое, при которой наступает равновесие с атмосферой.

Наиболее простым и распространенным подходом к вычислению скорости газообмена k является использование эмпирических зависимостей от скорости ветра. В настоящей работе использовались модели Cole & Caraco [6] (далее CC98), Vachon & Prairie [14] (VP13) и MacIntyre et al. [5] (M10). CC98 является одной из первых и наиболее широко используемых моделей. Так как эмпирические модели зависят от специфических условий, в которых они были получены (таких как морфометрия озера и погодные условия), они не являются универсальными, что вносит дополнительную неопределенность в конечные результаты. Для снижения этих неопределенностей существуют модели, учитывающие размеры озер (VP13), и турбулентность в поверхностном слое, возникающую в периоды охлаждения (M10).

Уравнение модели CC98:

$$k_{600} = 2,07 + 0,215U_{10}^{1,7}; \quad (2)$$

VP13:

$$k_{600} = 2,51 + (1,48U_{10}) + (0,39U_{10} \cdot \log_{10}LA); \quad (3)$$

M10, случай нагревания:

$$k_{600} = 1,74U_{10} - 0,15; \quad (4)$$

M10, случай охлаждения:

$$k_{600} = 2,04U_{10} + 2,0, \quad (5)$$

где U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, LA – площадь озера.

Скорость газообмена затем использовалась для расчета потока газа с единицы площади для каждой точки пробоотбора ($\text{ммоль}/\text{м}^2$ в сутки). Полученные значения были осреднены а затем умножены на площадь озера, для получения среднего потока с 1 м^2 и со всей площади зеркала соответственно. Для озер Светлое и Темное расчеты проводились с учетом площади зеркала, относящейся к акватории каждой из точек пробоотбора, для учета изменчивости потока в зависимости от глубин и биотопов. Для использования модели M10 необходимо определить происходит нагревание или охлаждение водоема, для этого использовались данные о потоке солнечной радиации в день пробоотбора из датасета ERA5-Land [13].

Результаты

Май 2022 г. по среднемесячной температуре воздуха ($7,4^\circ\text{C}$, метеостанция Архангельск) характеризуется как близкий к норме, рассчитанной за период 1991–2020 гг. В течение мая произошло перемешивание вод в оз. Мудьюгское до дна, в озерах Светлое и Темное – до хемоклина; температура воды достигла $4–6^\circ\text{C}$. Низкая температура воды отмечалась в оз. Иласском ($4,5^\circ\text{C}$). Температура воды в оз. Северное превысила 8°C .

Расчетные значения потоков варьируются в зависимости от акватории точек пробоотбора и используемой модели расчета. Разница концентраций в поверхностном слое и, следовательно, потоков CH_4 в пределах одного озера обусловливается различиями в морфометрии и биотопах между акваториями пробоотбора, их расположении относительно элементов рельефа, влияющих на скорость ветра и прочими факторами. Для исследуемых озер она колеблется от 9 до 85 % относительно максимальных для данного озера значений. Максимальная разница наблюдается в озерах Темное и Светлое (75 и 85 % соответственно).

Средние значения потока (рис. 2) с поверхности озера в ммолях с 1 m^2 в сутки, в зависимости от используемой модели, составляют 0,06–0,13 для Иласского, 0,12–0,29 для Мудьюгского, 0,24–0,56 для Северного, 0,11–0,27 для Светлого и 0,05–0,10 для озера Темного. Полученные результаты сравнимы с опубликованными данными потоков с поверхности boreальных озер Финляндии [12], но меньше, чем данные для озер Канады [8]. Из данных и представленного графика видно, что максимальный поток с единицы площади наблюдается во внутриболотном оз. Северном. В свою очередь в первичном оз. Иласском, расположенном в центральной части болота, поток значительно меньше. В прозрачных озерах Мудьюгское и Светлое, различающихся по морфометрии, но схожих по гидрохимическим показателям, величины потока сравнимы. Похожая картина наблюдается также в гуминовых озерах Иласском и Темном. При этом в прозрачных озерах, несмотря на меньшее содержание органических веществ, наблюдается больший поток, чем в гуминовых, что можно объяснить тем, что органическое вещество в гуминовых озерах труднодоступно для метаногенных архей.

Несмотря на максимальные значения потока с 1 m^2 , эмиссия метана со всего зеркала оз. Северное минимальна (0,051–0,119 кг/сут.), что обусловлено его малой площадью, и сравнима со значениями озер Мудьюгское (0,084–0,199 кг/сут.) и Темное (0,071–0,151 кг/сут.). Эмиссия с оз. Светлое составляет 0,263–0,619 кг/сут. и в значительной мере обусловлена активной жизнедеятельностью бактериальных матов в акватории Т.1. Максимальная эмиссия наблюдается на озере Иласском (1,635–3,365 кг/сут), где низкие значения потоков компенсируются значительной площадью водоема.

Из использованных моделей CC98 показывает наиболее низкие значения потока для всех озер. Такая тенденция к занижению результатов при использовании моделей, основанных только на зависимости от скорости ветра, отмечается и в зарубежных исследованиях [7; 10; 12]. Наибольшие значения потока по трем озерам из пяти, за исключением Мудьюгского и Северного, были получены моделью VP13, учитывающей при расчете площадь зеркала озера. Результаты, полученные моделью M10 сравнимы с моделью CC98 для гуминовых озер Темное и Иласское, и с моделью VP13 для прозрачных озер Светлое и Мудьюгское; потоки, полученные для оз. Северное, значительно превышают результаты остальных моделей.

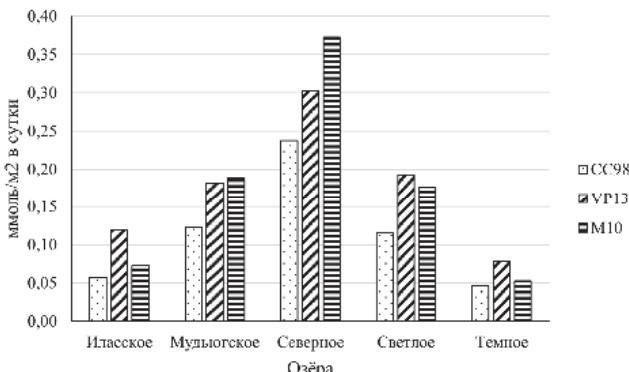


Рис. 2. Расчетные потоки CH_4 (ммоль/ м^2 в сутки), средние значения с 1 м^2 зеркала

Таким образом, результаты исследования показывают, что для корректной оценки эмиссии метана с поверхности бореальных озер необходимо более детальное изучение их пространственно-временной изменчивости, сбор большего количества данных и выявление неопределенностей, вызываемых использованием различных моделей. Результаты дальнейших исследований могут быть использованы для уточнения как оценок потоков парниковых газов с озер Европейского Севера России, так и глобальных оценок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00828.

Список литературы

- Голубятников Л. Л., Казанцев В. С. Вклад тундровых озер западной Сибири в метановый бюджет атмосферы // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 4. С. 430–438.
- Первые результаты о содержании метана в системе стратифицированных озер реки Светлая (водосборный бассейн Белого моря) / С. А. Забелина [и др.] // Геология морей и океанов : материалы XX Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. М. : ГЕОС, 2013. Т. 3. С. 156–160.
- Ресурсы поверхностных вод СССР / под ред. И. М. Жила, Н.М. Алюшкинской. Л. : Гидрометиздат, 1972. Т. 3 : Северный край. 663 с.
- Allocchthonous and autochthonous carbon in deep, organicrich and organic-poor lakes of the European Russian subarctic / A. Chupakov [et al.] // Boreal Environment Research. 2017. Vol. 22. P. 213–230.
- Buoyancy flux, turbulence, and the gas transfer coefficient in a stratified lake: turbulence and gas evasion in lakes / S. MacIntyre [et al.] // Geophysical Research Letters. 2010. V. 37, N 24.
- Cole J. J. Caraco N. F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF6 // Limnology and Oceanography. 1998. Vol. 43, N 4. P. 647–656.
- Consequences of gas flux model choice on the interpretation of metabolic balance across 15 lakes / H. A. Dugan [et al.] // Inland Waters. 2016. Vol. 6, N 4. P. 581–592.
- Do pool surface area and depth control CO₂ and CH₄ fluxes from an ombrotrophic raised bog, James Bay, Canada? / McEnroe N. A., Roulet N. T., Moore T. R., Garneau M. // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2009. Vol. 114, N G1. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JG000639> (дата обращения: 23.10.2022).

9. Is the subarctic landscape still a carbon sink? Evidence from a detailed catchment balance: a subarctic catchment carbon balance / Lundin E. J. [et al.] // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. № 5. P. 1988–1995.
10. Klaus M., Vachon D. Challenges of predicting gas transfer velocity from wind measurements over global lakes // Aquatic Sciences. 2020. Vol. 82, N 3. P. 53.
11. Liss P., Slater P. Flux of Gases Across the Air-Sea Interface // Nature. 1974. Vol. 247. P. 181–184.
12. Methane and carbon dioxide fluxes over a lake: comparison between eddy covariance, floating chambers and boundary layer method / K.-M. Erkkilä [et al.] // Biogeosciences. 2018. Vol. 15, N 2. P. 429–445.
13. Muñoz Sabater, J. ERA5-Land hourly data from 1981 to present // Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2019. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.e2161bac> (дата обращения: 03.10.2022).
14. Vachon D., Prairie Y. T. The ecosystem size and shape dependence of gas transfer velocity versus wind speed relationships in lakes // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2013. Vol. 70, N 12. P. 1757–1764.

УДК 556.5

Исследование гидрохимических показателей р. Черемшанки

М. А. Симонов (blocadeto@mail.ru)¹, В. И. Полетаева (alieva@igc.irk.ru)²,
О. А. Бархатова (barhat@geogr.isu.ru)¹

¹Иркутский государственный университет, Иркутск

²Институт геохимии им. А. П. Виноградова СО РАН, Иркутск

Аннотация. Научная и практическая значимость исследования заключается в том, что малые поверхностные водотоки, расположенные в крупных промышленных центрах, подвержены антропогенному воздействию. Представлены результаты гидрохимического исследования участка реки Черемшанка в районе г. Черемхово, начиная от истока и заканчивая местом промзоны (ТЭЦ-12) – предполагаемого основного антропогенного места загрязнения вод. Рассмотрен макроэлементный состав основной реки и приведены сравнительные графики изменения макрокомпонентного состава на всем протяжении в отличительных точках места отбора проб. Результаты исследования показали, что макроэлементный состав р. Черемшанки различен в каждой точке отбора проб.

Ключевые слова: Черемшанка, гидрохимические показатели, макроэлементы, гидрологический режим, качество воды, ИЗВ.

Введение

Одной из острых и важных проблем в настоящее время является проблема сохранения качества вод небольших поверхностных водотоков, расположенных в крупных промышленных центрах. К таким водотокам относится р. Черемшанка, протекающая по территории г. Черемхово. Значительный вклад в гидрохимический состав реки вносит антропогенная составляющая – промышленные и бытовые сточные воды города, а также поверхностный сток с сельскохозяйственных угодий и др.

Целью работы стало рассмотрение природных и антропогенных факторов, влияющих на формирования гидрохимического состава р. Черемшанки.

Объект исследования

Черемшанка – небольшая река в Иркутской области. Является левым притоком первого порядка р. Ангары. Берет начало в черте г. Черемхово, в болоте на высоте 556 м БС. Далее протекает через г. Черемхово и ряд более небольших поселений и впадает в Братское водохранилище в районе г. Свирска.

Морфометрические характеристики русла и водосбора вычислены на основе данных топографической карты масштаба 1:100 000 и цифровой модели рельефа SRTM с разрешением 77 м: площадь водосбора, составляет 116 км^2 , длина водотока – 24 км, общее падение реки – 160 м, средний уклон – $6,6 \text{ \%}$.

Общее количество притоков – 10, из них 2 постоянных, остальные – временные. Все притоки р. Черемшанка небольшие. Общая длина всех водотоков составляет 35,07 км. Густота речной сети – $0,349 \text{ км}/\text{км}^2$. В соответствии с классификацией Стралера – Философова восемь притоков являются водотоками 1 порядка, два притока – второго порядка.

Средняя ширина русла – 2–4 м, глубина в зависимости от уровня воды – 0,5–1,0 м. Водный режим р. Черемшанки характеризуется ярко выраженным весенним половодьем, относительно небольшими летними паводками и низкой зимней меженью. Установление ледостава, происходит в первой декаде ноября, а вскрытие реки и освобождение от ледяного покрова в начале апреля. Толщина льда к февралю достигает 1,0–1,5 м.

Низкие в верховьях берега к среднему течению, становятся крутыми. Река здесь имеет ярко выраженное русло, имеется небольшой пруд, на картах который обозначается как отстойник [2].

Согласно классификации Б. Д. Зайкова р. Черемшанка относится к рекам с периодически повторяющимися весенними половодьями, вызванными таянием снега в их бассейнах. По характеру весеннего половодья и режиму расходов в остальное время года р. Черемшанка относится к восточносибирский типу, т. е. наблюдаются высокое половодье, летне-осенние паводки и низкая зимняя межень.

Длительное время русло Черемшанки использовалось для сброса шахтной воды. В настоящий момент загрязнение воды продолжается в результате сброса сточных вод от различных предприятий и канализационных сооружений.

Большое влияние на р. Черемшанку оказывает деятельность Черемховской ТЭЦ-12: поступление разнообразных органических и неорганических соединений; мясокомбината, разреза «Черемховуголь», ООО «Рудоремонтный завод», ЗАО «Черемховгидромаш», ООО «Черемховская продовольственная компания», ООО «Черемховский завод стройматериалов» [3]. Вдоль берега расположено несколько угольных карьеров, которые загрязняют воду реки.

Наибольшим антропогенным воздействием характеризуется участок р. Черемшанки возле истока. В этом районе находятся заброшенные предприятия (функционировавшие в период СССР), техногенные отходы которых на протяжении многих лет попадали в почву.

Водоохранная зона, которая примыкает к береговой линии Черемшанки, составляет 100 м. К основным нарушениям в водоохранной зоне можно отнести [6]:

- строительство частного сектора;
- размещение автостоянок, в том числе не имеющих твердого покрытия;
- размещение отходов производства и потребления;
- выпас сельскохозяйственных животных и т. д.

Существует еще одна серьезная экологическая проблема – понижение уровня воды Черемшанки. Для того чтобы прекратить процесс деградации реки был создан проект по укреплению и поднятию берегов для главной реки и ее притоков, а также проект по очистке вод [7].

Методы исследования

В ходе проведения полевых исследований было отобрано 5 проб воды р. Черемшанки с целью проследить изменение основных гидрохимических показателей водотока по течению реки. Точки отбора представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Отбор проб производился в декабре 2022 г. Анализ выполнен в соответствии со стандартной сертифицированной аналитической процедурой контроля качества.

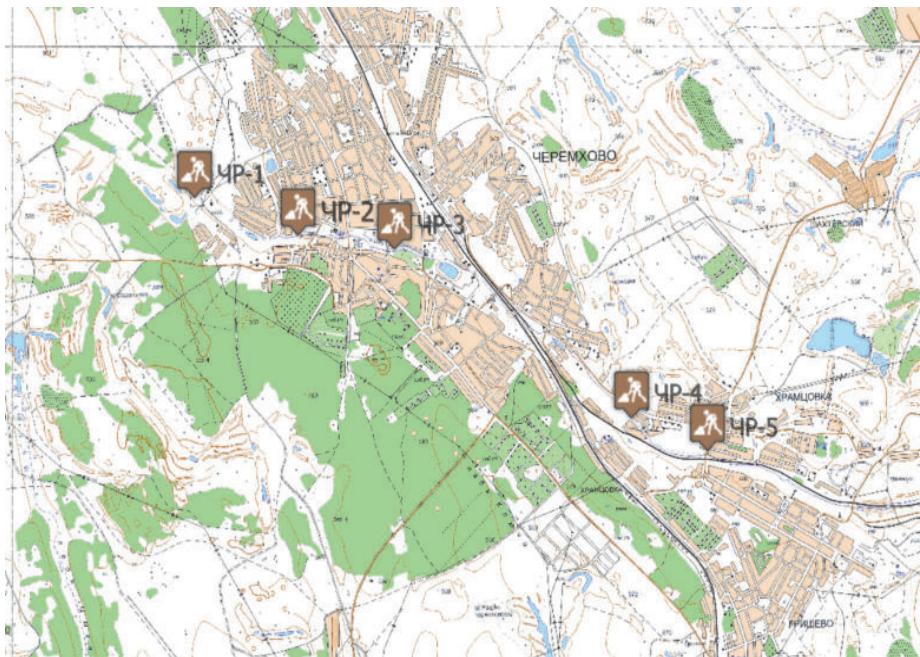


Рис. 1. Точки отбора проб воды

Таблица 1

Точкиprotoотбора

№	Обозначение	Описание
1	ЧР-1	Место бывших заводов по производству мясных изделий и производству строительных материалов (предполагаемый исток реки)
2	ЧР-2	Точка отбора пробы слияния крупного притока из озера с главной рекой
3	ЧР-3	Точка отбора пробы воды ниже канализационной трубы
4	ЧР-4	Точка отбора пробы воды выше предприятия ТЭЦ-12
5	ЧР-5	Точка отбора пробы воды ниже предприятия ТЭЦ-12

Результаты и обсуждение

Аналитические работы выполнены с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН. Получены результаты по макрокомпонентному составу, которые приведены в табл. 2.

Таблица 2

Гидрохимические показатели воды р. Черемшанка

Номер точки отбора	Характеристики	Показатели, мг/дм ³	ПДК _{px}	ИЗВ	Превышение ПДК, раз	Класс качества воды
ЧР-1	HCO ₃ ⁻	875	60	2,6	14,6	4 загрязненная
	Cl ⁻	51	300			
	SO ₄ ²⁻	31	100			
	K	26	10		2,6	
	Na	24	120			
	Ca	168	180			
	Mg	75	40		1,9	
ЧР-2	HCO ₃ ⁻	700	60	2,7	11,7	4 загрязненная
	Cl ⁻	89	300			
	SO ₄ ²⁻	427	100		4,27	
	K	10,0	10			
	Na	47	120			
	Ca	250	180		1,4	
	Mg	125	40		3,1	
ЧР-3	HCO ₃ ⁻	603	60	2,3	10,1	3 умеренно загрязненная
	Cl ⁻	99	300			
	SO ₄ ²⁻	377	100		3,8	
	K	8,5	10			
	Na	47	120			
	Ca	213	180		1,2	
	Mg	105	40		2,6	
ЧР-4	HCO ₃ ⁻	500	60	2,0	8,3	3 умеренно загрязненная
	Cl ⁻	84	300			
	SO ₄ ²⁻	305	100		3,1	
	K	8,0	10			
	Na	46	120			
	Ca	185	180		1,03	
	Mg	90	40		2,3	

Номер точки отбора	Характеристики	Показатели, мг/дм ³	ПДК _{px}	ИЗВ	Превышение ПДК, раз	Класс качества воды
ЧР-5	HCO ₃ ⁻	501	60	2,0	8,4	3 умеренно загрязненная
	Cl ⁻	88	300			
	SO ₄ ²⁻	317	100		3,2	
	K	7,7	10			
	Na	47	120			
	Ca	190	180		1,05	
	Mg	91	40		2,3	

Для оценки качества воды Черемшанки был посчитан индекс загрязнения водоемов (ИЗВ) для того, чтобы выяснить степень загрязнения реки в каждой точке отбора:

$$\text{ИЗВ} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}}{n}, \quad (1)$$

где C_i – концентрация i -показателя, ПДК – предельно допустимая концентрация, согласно СанПиН 1.2.3685-21, n – количество используемых показателей.

ИЗВ подразделяется на категории: до 0,3 – очень чистая, (0,3–1,0] – чистая, (1,0–2,5] – умеренно загрязненная, (2,5–4,0] – загрязненная, (4,0–6,0] – грязная, (6,0–10,0] – очень грязная, более 10,0 – чрезвычайно грязная.

Распределение макрокомпонентов по течению реки представлено на рис. 2.

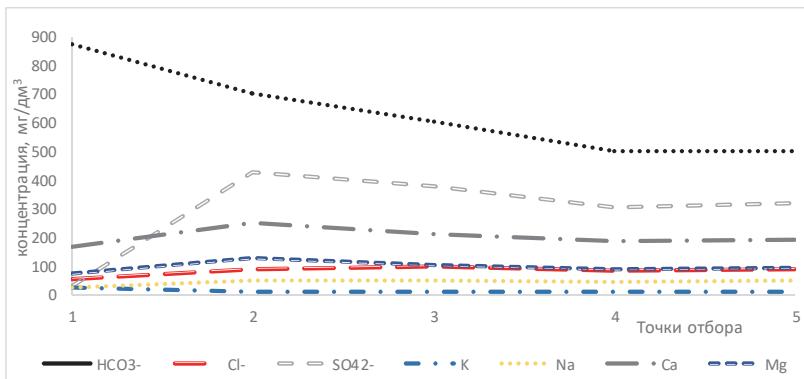


Рис. 2. Распределение макрокомпонентов

Анализируя полученные данные можно сделать общий вывод, что вода в р. Черемшанке в верхнем течении относится к 4-му классу и является загрязненной, далее вниз по течению вода по качеству переходит в 3-й класс и становится умеренно загрязненной. Наиболее загрязненным оказался участок слияния главной реки и притока, вытекающего из озера. Фиксируются большие содержания следующих ионов SO₄²⁻ (превышение ПДК в 3,1–3,8 раза), Ca²⁺ (превышение

ПДК в 1,03–1,4 раза), Mg^{2+} (превышение ПДК в 1,9–3,1 раз). Это хорошо согласуется с полученными ранее сотрудниками Института геохимии СО РАН результатами [7], где также отмечалось, что в воде присутствуют высокие содержания основных ионов (SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , K^+ , Na^+). Отмечено, что наблюдается наибольшее содержание хлор-иона среди всех исследованных рек Прибайкалья (36,8 мг/дм³).

Заключение

Для изучения степени влияния антропогенной деятельности на экологогеохимическое состояние реки необходимо проводить постоянный мониторинг за ее гидрологическими и гидрохимическими показателями и оценивать изменения, происходящие в экосистеме водотока. Данная работа является начальным этапом исследования данной реки. В дальнейшем планируется расширить список определяемых гидрохимических показателей.

Но уже и на первом этапе видно, что р. Черемшанка расположена в зоне техногенного влияния двух городов – Черемхово (угольная промышленность) и Свирск (мышьяковистые отвалы), поэтому высокие концентрации некоторых ионов, очевидно, имеют техногенное происхождение и как правило отмеченные повышения содержания некоторых ионов являются следствием техногенного влияния угольного разреза.

Список литературы

1. Река Черемшанка. URL: <https://sukharev-y.ru/rubцов-в-н-река-черемшанка> (дата обращения: 20.03.2022).
2. Промышленные предприятия Черемхово. URL: http://chertown.ru/predpriyatiya_goroda_cheremhovo.php (дата обращения: 20.03.2022).
3. Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2011 году. Иркутск : Иркутскгеофизика, 2012. С.120–121.
4. ГОСТ 31861-2012. Общие требования к отбору проб. М. : Стандартинформ, 2019. 26 с.
5. Индекс загрязнения воды. URL: <https://studfile.net/preview/5050018/page:8/> (дата обращения: 06.11.2022).
6. Гидрохимические характеристики воды некоторых рек Прибайкалья. URL: <https://pan-dia.ru/text/77/484/16739.php> (дата обращения: 06.11.2022).

УДК 574.52+574.64

Биотестирование экотоксичности мочевины на основе флюoresценции хлорофилла клеток водорослей

А. Д. Стом (apatania@yandex.ru)^{1,2}, А. Э. Балаян (7balla@mail.ru)²,

М. Н. Саксонов (msaksonov@mail.ru)²

¹Иркутский государственный университет, Иркутск

²НИИ биологии при ИГУ, Иркутск

Аннотация. Исследовано влияние мочевины на уровень флюoresценции хлорофилла клеток зеленых водорослей *Scenedesmus quadricauda* и сине-зеленых водорослей *Microcystis aeruginosa* в слабоминерализованной воде. При действии мочевины отмечена стимуляция флюoresценции хлорофилла клеток *S. quadricauda* в байкальской воде в концентрациях 0,001 и 0,005 г/дм³ в 2,6 раза и 4,2 раза, соответственно по сравнению с контролем. Увеличение под влиянием мочевины в концентрациях (0,001–0,050) г/дм³ уровня флюoresценции хлорофилла клеток водорослей *M. aeruginosa* зарегистрировано в байкальской воде в 1,5–1,6 раз.

Ключевые слова: экологическая токсичность, биотестирование, водоросли, биогены, мочевина, флюoresценция хлорофилла, численность клеток.

Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что водоросли быстро реагируют на нарушение биологического равновесия при изменении экологических условий [2; 5; 8; 10; 11]. Массовое развитие водорослей или «цветение» воды порождается нуждающимися в большом количестве биогенных веществ представителями родов *Planktothrix*, *Scenedesmus*, *Microcystis*, *Dolichospermum* (*Anabaena*), *Aphanizomenon* и это приводит к снижению и качества воды и рекреационных возможностей водоема. Более того некоторые виды водорослей выделяют опасные токсины для жизни и здоровья человека и животных [1; 13; 14].

Термин Harmful Algal Bloom (HAB) – вредоносное цветение водорослей – применяется к различным видам фитопланктона, принадлежащим к широкому разнообразию филогенетических групп. Существует консенсус в отношении того, что HAB – явление сложное, обычно вызываемое не одним фактором окружающей среды, а множеством физико-химических и биологических факторов, что затрудняет выявление причин возникновения и прогноз долговременной динамики цветения. Показано, что температура воды влияет лишь на начало роста пресноводного фитопланктона, в то время как на величину пиков влияют градиенты питательных веществ, доступности света и пресса выпаса.

Ключом к экологическому успеху, к примеру, у цианобактерий является их способность преодолевать неблагоприятные условия. Летнее HAB сопровождается седиментацией стадий покоя цианобактерий. Отряды цианобактерий используют разные стратегии для сохранения в донных отложениях, включая образование «спящих» колоний в отряде Chroococcales (колониальный Chroococcalean, *Microcystis*). Их образование происходит в толще воды и запускается условиями, неблагоприятными для роста вегетативных клеток (темпер-

тура, интенсивность света, концентрация питательных веществ), обычно имеющими сезонный характер и возникающими в конце лета или осенью. Акинеты метаболически активны, скорость фотосинтеза у них ниже, а дыхания выше, чем в вегетативных клетках. Исследование жизнеспособности и потенциала прорастания цианобактерий показывает способность интактных акинет к делению клеток даже после 1800 лет пребывания в донных отложениях, и деградация акинетов не увеличивается со временем, проведенным в осадке. Они пребывают в донных отложениях, пока улучшение водных условий не приводит к реинвазии в водную толщу [6].

Таким образом, одним из основных факторов, лимитирующий эвтрофирование водоемов – концентрация солей фосфора, азота [4; 15]. В последнее время во многих водоемах наблюдаются процессы эвтрофирования, что резко оказывается на качестве воды и как следствие, на состоянии гидробионтов, эти процессы наблюдаются даже в Байкале [3; 10].

Сток загрязняющих веществ и биогенных элементов с урбанизированных территорий – важнейший источник токсического загрязнения и эвтрофирования водных объектов, который трудно поддается учету [7].

В качестве тест-объекта использовали одноклеточные зеленые водоросли – типичных представителей фитопланктона *S. quadricauda*, а также сине-зеленые водоросли *M. Aeruginosa* (последние предоставлены и.о. заведующего лабораторией водной микробиологии Лимнологического института Белых Ольгой Ивановной). Токсическое действие вод, содержащих мочевину, определяли по изменению уровня флюoresценции хлорофилла клеток водорослей *S. quadricauda* на анализаторе жидкости «Флюорат 02–3М» [ФР.1.39.2007.03223] [9]. Водоросли *S. quadricauda* выращивались в среде Прата, сине-зеленые водоросли *Mycrocystis aeruginosa* в среде Z-8 (Rippka, 1988).

Возбуждение флюoresценции хлорофилла в диапазоне 420–500 нм; регистрация флюoresценции хлорофилла в диапазоне 650–730 нм. Численность водорослей в начале биотестирования определяли в камере Горяева, и она составляла в каждой колбе 30–33 тыс. кл/см³.

Колбы с контрольными и исследуемыми растворами, водорослями помещали на 72 ч в люминостат – термостат ТСО-1/80 с установленной температурой 24 °C и освещенностью ~ 5500 ЛК (световой период 24 ч). Измеряли уровень флюoresценции хлорофилла водорослей в начале биотестирования в контрольных колбах и в конце, и через 72 ч в каждой колбе.

Предварительно показали линейную зависимость уровня флюoresценции хлорофилла водорослей от численности клеток в диапазоне 25–500 тыс. кл/см³. Ингибирование или стимуляцию флюoresценции хлорофилла клеток водорослей определяли по отношению интенсивности флюoresценции в опыте (Иоп) к этому параметру в контроле $T = \text{Иоп}/\text{Ик} \cdot 100\%$

Мочевина ингибировала флюoresценцию хлорофилла клеток водорослей в концентрациях (10,0–30,0) г/дм³. Действовала на уровне контроля в концентрации 5 г/дм³ и стимулировала исследуемый параметр в концентрациях меньше 5 г/дм³ (рис. 1).

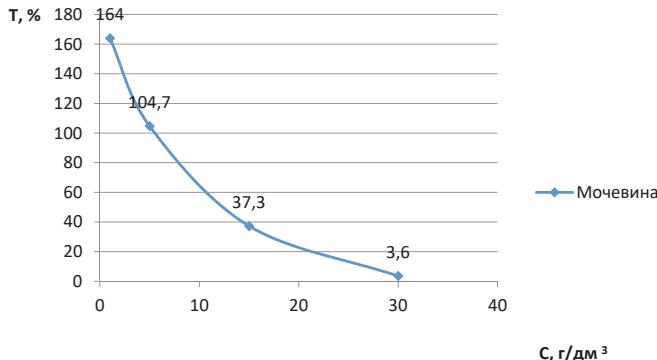


Рис. 1. Влияние мочевины на изменение уровня флюоресценции клеток водорослей *S. quadricauda*

Однако последнее не означает ее полную безопасность для водоемов, в связи с влиянием биогенов на их эвтрофирование. Проверяли действие больших и меньших концентраций мочевины. В итоге, если через трое суток флюоресценция в контроле составила $J_0=0,162$, то при концентрациях 15 и 30 г/дм³ $J = 0,06$ и 0,012, соответственно. Чтобы проверить влияют ли концентрации меньше 0,1 г/дм³ необходимо было исключить возможное совместное действие компонентов среды Прата и мочевины. Были поставлены опыты по влиянию компонентов среды Прата, которые были добавлены в воду из оз. Байкал. Контролем в данном случае служила вода без добавления мочевины (табл. 1).

Таблица 1

Влияние мочевины на уровень флюоресценции хлорофилла клеток водорослей *S. quadricauda* (в условных единицах (J , усл. ед.) в отсутствии и в присутствии солей среды Прата (относительно контроля в %)

Концентрация мочевины, г/дм ³	Байкальская вода		Байкальская вода + соли среды Прата	
	J, усл. ед.	A %	J, усл. ед.	A %
0,0 (контроль)	0,047	100	0,172	100
0,05	0,105	223	0,289	168
0,005	0,196	417	0,298	173
0,001	0,122	260	0,255	148

Мочевина в концентрациях (0,001–0,050) г/дм³ вызывает увеличение уровня флюоресценции хлорофилла и, следовательно, рост численности клеток водорослей в байкальской воде и в байкальской воде с добавлением среды Прата.

Как и можно было ожидать уровень флюоресценции хлорофилла клеток водорослей (J , усл. ед.) при действии мочевины был значительно выше в байкальской воде с добавлением среды Прата, но картина меняется, если мы сравниваем изменение уровня флюоресценции хлорофилла в процентном соотношении (A, %) относительно собственного контроля.

Также изучали действие малых концентраций мочевины ($0,001\text{--}0,050$ г/дм³) растворенной в байкальской воде на флюoresценцию хлорофилла сине-зеленых клеток водорослей *M. aeruginosa* (табл. 2).

Таблица 2

*Влияние мочевины на уровень флюoresценции хлорофилла клеток водорослей *M. aeruginosa**

Концентрация мочевины, г/дм ³	Байкальская вода	
	J, усл. ед.	A %
0,0 (контроль)	0,0025	100
0,05	0,0038	152
0,005	0,0039	156
0,001	0,0041	164

Мочевина в концентрации ($0,001\text{--}0,050$) г/дм³ в байкальской воде вызывала увеличение уровня флюoresценции хлорофилла клеток водорослей *M. aeruginosa* на 50–60 % по сравнению с контролем. Причем, рост уровня флюoresценции хлорофилла практически не менялся при действии изучаемых концентраций мочевины.

Таким образом, в результате этой работы было выявлено следующее:

Показано увеличение уровня флюoresценции хлорофилла клеток водорослей *S. quadricauda* в байкальской воде с добавлением среды Прата в 1,5–1,7 раз по сравнению с контролем при действии мочевины к концентрациям ($0,001\text{--}0,050$) г/дм³.

Отмечена стимуляция флюoresценции хлорофилла клеток водорослей *S. quadricauda* в слабоминерализованной среде (байкальская вода) при действии мочевины в концентрациях 0,001 и 0,005 г/дм³ в 2,6 раза и 4,2 раза, соответственно, по сравнению с контролем, а в концентрации 0,001 г/дм³ в 2,6 раза и в 1,4 раз соответственно.

Подобный эффект, несколько менее выраженный, показан при действии малых концентраций мочевины ($0,001\text{--}0,005$) г/дм³ на флюoresценцию хлорофилла сине-зеленых клеток водорослей *M. aeruginosa* в байкальской воде.

Это свидетельствует о возможном значительном увеличении численности клеток зеленых и сине-зеленых водорослей на локальных участках слабоминерализованного водоема при поступлении мочевины в составе сточных вод.

Список литературы

1. Microcystin-producing cyanobacteria in water reservoirs of Russia, Belarus and Ukraine / Belykh O. I., Gladkikh A. S., Sorokovikova E. G., Tikhonova I. V., Potapov S. A., Fedorova G. A. // Chemistry for Sustainable Development. 2013. Vol. 21, N 4. P. 347–361.
2. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton / Reynolds C. S., Huszar V., Kruk C., Naselli-Flores L., Melo S. // J. Plankton Res. 2002. Vol. 24, N 5. P. 417–428. <https://doi.org/10.1093/plankt/24.5.417>.
3. Обнаружение микроцистинов в цианобактериальных обрастаниях различных субстратов прибрежной зоны озера Байкал / О. И. Белых, Г. А. Федорова, А. В. Кузьмин, И. В. Тихонова, О. А Тимошкин., Е. Г. Сороковикова // Вестник Московского университета. Серия 16, Биология. 2017. № 4. С. 262–269.
4. Волков Н. В., Снежко В. Л. Статистический анализ биохимической очистки сточных вод // StudNet. 2022. Т. 5, № 4. С. 2964–2976.

5. Горохова О. Г. Состав массовых видов и структура альгоценозов при «цветении» воды в малых водоемах юга лесостепного Поволжья // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. 2018. Т. 160. Кн. 2. С. 276–291.
6. Кацулин Н. А., Беккелунд А. К. Изменения климата и цветение арктического озера Имандря // Биосфера. 2022. Т. 14, № 2. С. 98–125.
7. Клубов С. М., Третьяков В. Ю. Сток биогенных элементов и загрязняющих веществ с городских водосборов // Вестник Российской университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30, № 3. С. 217–226.
8. Антропогенное эвтрофирование водоемов как глобальная экологическая проблема / В. З. Латыпова, Н. Ю. Степанова, О. В. Никитин, Л. Ю. Халиуллина // Чистая вода. Казань : сб. тр. VII Междунар. конгр. Казань : Новое знание, 2016. С. 26–30.
9. Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей: ФР 1.39.2007.03223. М. : Акварос, 2007. 48 с.
10. Россолимо Л. Л. Антропогенное эвтрофирование водоемов // Итоги науки и техники. Общая экология. Биоценология. Гидробиология. М. : Наука, 1975. Т. 2. С. 8–60.
11. Русинек О. Т., Тахтев В. В., Гладкочуб Д. П., Ходжер Т. В., Буднев Н. М. Байкаловедение. Новосибирск: Наука, 2012. Кн. 2. 1114 с.
12. Сиренко Л. А., Гавриленко М. Я. «Цветение» воды и эвтрофирование. Киев : Наукова думка, 1978. 232 с.
13. Структура и токсичность цианобактерий в рекреационных зонах водоемов Казанского региона / Н. Ю. Степанова, Л. Ю. Халиуллина, О. В. Никитин, В. З. Латыпова // Вода: химия и экология. 2012. № 11 (53). С. 67–72.
14. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л. : Гидрометеоиздат, 1990. 278 с.
15. Шашуловская Е. А. О необходимости региональной регламентации органического вещества и биогенных элементов в нижневолжских водохранилищах // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 1. С. 25–38.

УДК 543.3

Проблемы качества воды оз. Гусиное (Республика Бурятия)

В. О. Хорошевская (vv.z2@yandex.ru), М. А. Голубкина (marishkagol@mail.ru)

Гидрохимический институт, Ростов-на-Дону

Аннотация. Даётся описание оз. Гусиное, второго по величине после оз. Байкал пресноводного водоема в Республике Бурятия, являющегося питьевым водозабором для населения региона. Оценивается обеспеченность поступающей в Росгидромет информацией по загрязнению оз. Гусиное при проведении наблюдений государственной системы наблюдений и лицензиата (локальной системы наблюдений) г. Гусиноозёрск, район выпуска сточных вод филиала «Гусиноозёрская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация». Анализируются тенденции среднегодовых распределений характерных загрязняющих веществ за последние пять лет. В результате анализа установлено, снижение среднегодовых содержаний соединений меди и цинка и планомерное повышение среднегодовых концентраций нефтепродуктов в воде оз. Гусиное. Последнее является недопустимым процессом, требующим более детального исследования для установления причин и источников загрязнения.

Ключевые слова: оз. Гусиное, загрязнение поверхностных вод, нефтепродукты, органические вещества.

Озеро Гусиное второй по площади водоем в республике Бурятия после оз. Байкал. Расположено озеро в Селенгинском среднегорье, в тектонической впадине в центре Гусиноозёрской котловины на высоте 550 м над у. м., между Хамбинским хр. Хамар-Дабана на северо-западе и хребтом Моностой с грядой Холбольджин на юго-востоке. Водоем имеет единственный сток – из южной оконечности озера вытекает р. Баян-Гол, левый приток р. Селенги.

С 1976 г. оно используется как водоем-охладитель для Гусиноозёрской ГРЭС – крупнейшей электростанции Бурятии. Система охлаждения станции – оборотная, т. е. отобранная для охлаждения вода возвращается в водоем и снова используется в производственном цикле. Озеро также является источником питьевого водоснабжения для г. Гусиноозёрска, численность населения которого в 2019 г. достигала 24 600 человек и прибрежных поселков, поэтому вопросы качества воды оз. Гусиное являются жизненно важными для населения и обеспечения работы ГРЭС. На побережье озера длительное время располагались предприятия угледобычи – разрезы Холбольджинский, Байн-Зурхе и шахты. В пределах Холбольджинского участка вскрышные и добывающие работы открытым способом велись с 1963 г. Разрез «Холбольджинский» проектной мощностью 3 млн тонн угля в год был введен в эксплуатацию в 1978 г. Несколько позже начата открытая добыча на Байн-Зурхенском участке. В 1994–2000 гг. на этом участке находилась в эксплуатации шахта. Угольные предприятия в 2000 г. прекратили производственную деятельность, но территория их размещения до сих пор не рекультивирована и оказывает негативное воздействие на состояние озера за счет поверхностного и подземного стока загрязненных вод с отходов добычи и вскрышных пород [2; 3].

В 2022 г. после обращения Народного фронта Восточно-Байкальская природоохранная прокуратура возбудила административные дела о нелегальном использовании Гусиного озера в Селенгинском районе в ходе незаконных действий Гусиноозёрской ГРЭС, наносящих вред экологии. Гусиноозёрская ГРЭС в сентябре этого года запустила дополнительный энергоблок, для охлаждения которого был прорыт канал в озере. Народный фронт предположил, что это незаконно, потому что разрешительных документов оформлено не было [1].

На оз. Гусином регулярные наблюдения проводятся с 1964 г. филиалом ФГБУ «Забайкальское УГМС» – Бурятским ЦГМС. Пункт наблюдений 17200 оз. Гусиное ст. Гусиное Озеро (рис. 1). Целью открытия данного пункта было получение информации о качестве воды озера в районе населенного пункта и организованного сброса сточных вод. В основные гидрологические фазы здесь отбирается пять проб в год с поверхности горизонта. В программу работ входит определение следующих показателей: визуальные наблюдения, температура, pH, удельная электропроводность, окислительно-восстановительный потенциал взвешенные вещества, цветность, прозрачность, запах растворенный кислород, % насыщения кислородом, диоксид углерода, главные ионы, ХПК, БПК₅, азот аммонийный, азот нитритный, азот нитратный, фосфор фосфатов, фосфор общий растворенный, железо общее, кремний, фенолы летучие, СПАВ, медь, цинк, свинец, кадмий.

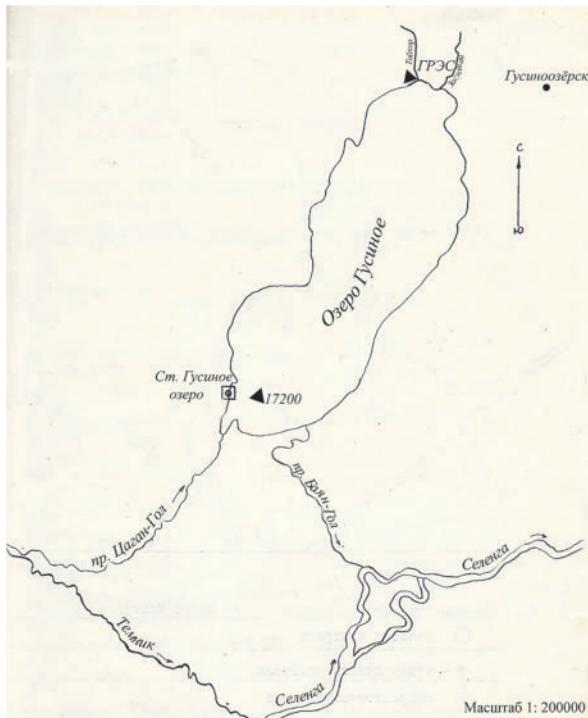


Рис. 1. Карта-схема пунктов наблюдений на оз. Гусиное

В 2001 г. филиалом «Гусиноозёрская ГРЭС» Акционерное общество «Интер РАО – Электрогенерация» был открыт пункт наблюдений 17001 г. Гусиноозёрск, район выпуска сточных вод филиала «Гусиноозёрская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация» (рис. 1). Открытие пункта наблюдений лицензиатом Росгидромета было согласовано филиалом ФГБУ «Забайкальское УГМС» – Бурятским ЦГМС. Целью открытия пункта наблюдений была оценка воздействия выпуска сточных, в том числе дренажных, вод предприятия на качество поверхностных вод. Имеющаяся информация по составу загрязняющих веществ в выпуске сточных вод предприятия за 20 лет могла бы прояснить сложившуюся на сегодняшний день ситуацию с качеством воды в оз. Гусином. К сожалению, данная информация не поступает в банк данных гидрохимической информации ФГБУ «Гидрохимический институт» и не может быть оценена специалистами-гидрохимиками института.

Анализ среднегодовых значений, полученных в рамках проведения наблюдений, проводимым на государственной сети, позволяет сделать следующие выводы. Среднегодовое содержание соединений металлов, определение которых входит в программу наблюдений на оз. Гусином, меди и цинка планомерно снижается (рис. 2, 3).

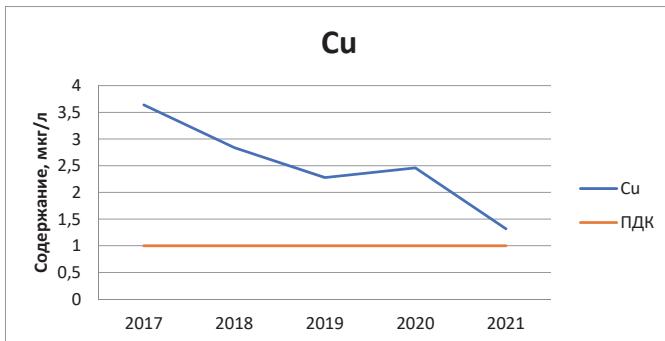


Рис. 2. График распределения среднегодовых содержаний соединений меди

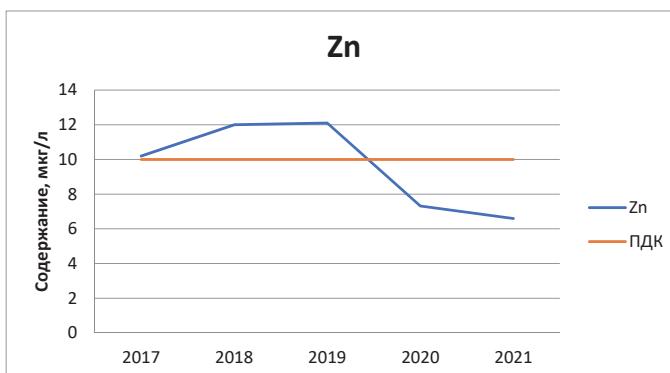


Рис. 3. График распределения среднегодовых содержаний соединений цинка

Характерными загрязняющими веществами последние пять лет (превышение ПДК в более 50 % проб) и оз. Гусиное, являются нефтепродукты и органические вещества (определеняемые по химическому потреблению кислорода – ХПК). И если в динамике изменения содержания органических веществ не наблюдается явных трендов (рис. 4, 5), то в динамике изменения содержания нефтепродуктов фиксируется планомерное увеличение содержаний в течение пяти лет. Это является недопустимым процессом, требующим более детального исследования для установления причин и источников загрязнения. Так как это не только ухудшает состояние воды в самом озере, но является источником поступления нефтепродуктов в приток р. Селенга.

В настоящее время в общем антропогенном воздействии на химический состав вод озера не представляется возможным выделить собственно влияние стоков с ГРЭС и нерекультивированных бывших угольных разрезов, и влияние железной дороги и железнодорожной станции.

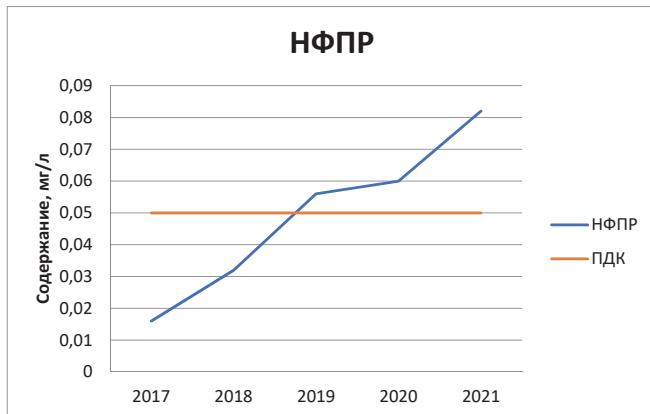


Рис. 4. График распределения среднегодовых содержаний нефтепродуктов

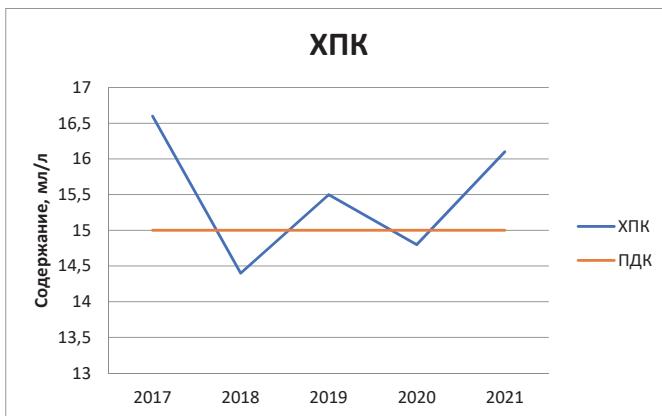


Рис. 5. График распределения среднегодовых содержаний органических веществ

Отсутствие информации из ведомственного пункта 17001 г. Гусиноозёрск, район выпуска сточных вод филиала «Гусиноозёрская ГРЭС» АО «Интер РАО – Электрогенерация», не позволяет полностью исключить влияние стоков ГРЭС на данный процесс.

Список литературы

1. Гусиное озеро в Бурятии пострадало от деятельности ГРЭС – БайкалИНФОРМ. URL: <https://baikalinform.ru/ekologiya/gusinoe-ozero-v-buryatiy-postradalo-ot-deyatelbnosti-gres> (дата обращения: 26.10.2022).
2. Влияние природных и антропогенных факторов на качество воды в водоемах-охладителях (на примере оз. Гусиное) / А. Н. Лукьянова, О. Н. Лукьянова, Л. Е. Ефимова, В. А. Ефимов // Водное хозяйство России. 2020. № 2. С. 146–162.
3. Изменение гидрохимического режима озера Гусиное под воздействием угледобывающего производства / Д. И. Жамбалова, А. М. Плюснин, М. К. Чернявский, Е. Г. Перезева, А. В. Украинцев // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами : сб. материалов четвертой Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Улан-Удэ : Геол. ин-т СО РАН, 2020. С. 224–226.

УДК 556.55

Расчет обеспеченного объема озера

М. А. Шевелев (mikhail.shevelev.01@bk.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Актуальность статьи обусловлена отсутствием надежного метода расчета обеспеченных характеристик водоемов при отсутствии данных, что вызывает значительные трудности при строительстве объектов, которые в будущем будут располагаться в непосредственной близости к озеру. Цель статьи состоит в предложении усовершенствованного метода расчета обеспеченных характеристик озер методом редукционных формул. В результате исследования был выведен новый эмпирический коэффициент для расчетной формулы, который позволяет расширить границы использования этого метода.

Ключевые слова: гидрологические расчеты при отсутствии данных гидрометеорологических наблюдений, расчет максимальных и минимальных уровня и объема озера.

В данной работе автором предлагается к использованию усовершенствованной формулы расчета. За основу была принята формула приблизительного расчета максимального уровня воды в озере, изложенной в СП 33-101-2003 «Определение основных гидрологических характеристик». В соответствии нормативным документом она имеет вид:

Для ориентировочных расчетов наивысших уровней воды проточных озер в зоне избыточного увлажнения используют зависимость:

$$\bar{\Delta}H = \beta (A / \Omega)^{0.5}, \quad (1)$$

где $\bar{\Delta}H$ – средний многолетний весенне-летний подъем уровня воды в озере над порогом стока, см; A – площадь водосбора озера, км^2 ; Ω – площадь зеркала озера, км^2 ; β – коэффициент, определяемый по данным наблюдений на соседних озерах с близкими соотношениями морфометрических характеристик и режимом стока из водоема.

Для Кольского полуострова и Карелии β принимают равным 20, для озер северных и центральных областей европейской территории России – 32.

Переход от среднего многолетнего подъема уровня к подъему расчетной вероятности превышения производят по кривым обеспеченности с параметрами C_v и отношением C_s / C_v , установленным также по данным наблюдений на соседних, изученных морфологически однородных озерах.

Зависимость (1) применима для отношения A / Ω менее 250.

Для карстовых, периодически исчезающих озер, а также для озер с искаженным естественным режимом обязательно производство полевых исследований.

Как видно из описания методика расчета, данная формула не применима на территории вне зоны многолетнемерзлых пород. Это связано с тем, что коэффициент β в формуле (1) учитывает перепад уровня, связанный с прямым и диффузным притоком и оттоком воды в озере, испарением с водной поверхности. В условиях крайнего севера допустимо пренебрежение динамикой подземных вод, связанное с практически полным промерзанием водоносных гидрологических

горизонтов, использовать ее в прочих природных условиях невозможно. Даже при наличии питания или разгрузки водоносных горизонтов за счет воды, находящейся в озере, эта величина незначительна и при расчете коэффициента β динамикой подземных вод пренебрегают ввиду ее незначительного влияния на формирования объема водного объекта.

В условиях, отличных от условий распространения многолетнемерзлых пород, подобное пренебрежение не может быть использовано, поскольку подземные воды могут оказывать существенное влияние на формирование объема озера, и как в следствии на уровень воды водного объекта. Для решения существующей проблемы необходимо ввести новый коэффициент, который позволяет учитывать динамику вод подземных горизонтов.

При добавлении нового коэффициента формула (1) имеет следующий вид:

$$\bar{\Delta}H = \frac{\beta}{\gamma} (A / \Omega)^{0.5}, \quad (2)$$

где γ – это поправочный коэффициент гидрогоеодинамического баланса

Расчет коэффициента γ для изученного озера – аналога производится по формуле (3) представленной ниже:

$$\gamma = \frac{\bar{\Delta}_H}{\hbar \omega_{\text{amp}}} \quad (3)$$

где $h_{\text{амп}}$ – это амплитуда между максимальным и минимальным наблюденными уровнями изученного озера-аналога, $\bar{\Delta}H$ – среднемноголетнее колебание уровня озера-аналога.

Данное отношение позволяет уточнить увеличение или уменьшение объема озера в результате динамики подземных вод. В сущности данный коэффициент уточняет величину β в формуле (1), что позволяет увеличить территорию использования метода.

После расчетов величин γ для изученного – озера аналога, его можно использовать для расчета уровня исследуемого озера.

В инженерной гидрологии в большинстве случаев недостаточно использовать только максимальные и минимальные значения характеристик водных объектов, поскольку при проектировании и строительстве необходимы обеспеченные значения характеристик. Переход от максимальных и минимальных значений уровня озера к обеспеченным более трудоемок, и его выполнение невозможно без полевых изысканий как на исследуемом водном объекте, так и на озере – аналоге.

Поскольку уровень воды в озере напрямую зависит от объема воды, находящейся в нем, переход к обеспеченным величинам будет осуществляться следующим образом:

где $W_{\text{исл}}$ – объем исследуемого (изыскиваемого) озера, определенный в ходе полевых исследований; $W_{\text{ан}}$ – объем озера – аналога, определенный в ходе полевых

исследований или по результатам прочих исследований; θ – отношение объема исследуемого (изыскиваемого) озера к озеру аналогу.

Важно учитывать, что объем озера – это случайная величина. Поэтому для формулы (4) необходимо получить данные об объеме уровня в один момент при установлении минимальных уровней (в идеале во время глубокой зимней межени).

Оператор θ необходим для соотношения объемов озер в последующих расчетах. Переход к обеспеченным характеристикам осуществляется по аналитической кривой трехпараметрического гамма распределения. Значения коэффициентов C_v , C_s и их отношение принимаются для исследуемого водоема по рядам наблюдений изученного озера, при этом средний объем объекта исследований находится:

$$\theta * W_{\text{анср}} = W_{\text{исср}} \quad (5)$$

где $W_{\text{анср}}$ – средний объем озера аналога. Переход к среднему объему озера осуществляется с помощью кривой зависимости $W = (f)H$, с использованием значения среднего уровня изученного водного объекта; $W_{\text{исср}}$ – средний объем исследуемого озера, полученный расчетным путем.

При наличии непродолжительного ряда гидрологических наблюдений на исследуемом озере, среднее значение стоит принимать по рядам наблюдений.

После получения данных о среднем объеме озера, значениях коэффициентов вариации, асимметрии и их отношении осуществляется переход к обеспеченным характеристикам.

Переход к обеспеченному уровню осуществляется по кривой связи $W = (f)H$.

Пример расчета

Необходимо рассчитать уровень 3 % обеспеченности оз. Крытое, используя в качестве аналога оз. Шедока. Оба озера располагаются в одинаковых физико-географических условиях на расстоянии 23 км друг от друга.

Озеро Шедока имеет беспрерывный период наблюдений 50 лет. Среднеколебание уровня составляет 58 см. Гидрографические характеристики озер представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гидрографические характеристики озер

Название	Площадь водосбора, км ²	Площадь водного зеркала, км ²
Шедока	24 523	1400
Крытое	10 598	569

В ходе обработки гидрологической информации были определены характеристики озера Шедока, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Гидрологические характеристики оз. Шедока

Наблюденные характеристики	Максимальный	Минимальный	Средний	Амплитуда
Уровень, см	387	-15	254	402
Объем, м ³	1 458 003	784 589	989 752	673 414

Переход от уровенных к объемным характеристикам был произведен по кривой связи уровня от объема.

Статистические значения $C_v = 0,3$, $C_s = 1,5$; их отношение 5.

В первую очередь рассчитывается коэффициент β для изученного оз. Шедока по формуле (6):

$$\beta = \bar{\Delta} H (\Omega/A)^{0,5} \quad (6)$$

В результате коэффициент β для оз. Шедока принимает значение 14.

Следующим этапом является расчет коэффициента γ по формуле (3). Исходя из соотношения, γ имеет значение 0,1.

На данном этапе гидрологических расчетов, можно определить значения максимального и минимального уровня воды в неизученном озере Крытое по формуле (2).

В сущности, расчетная величина $\bar{\Delta} H$ является увеличением уровня за счет поступившей в котловину озера воды. Для определения максимального уровня, необходимо числовое значение $\bar{\Delta} H$ прибавить к минимальной отметке исследуемого водного объекта. Для определения минимального уровня – вычесть из максимального.

Переход к обеспеченным характеристикам начинается с формулы (4). Объемы озер были определены во время глубокой зимней межени. В итоге θ принимает значение 0,67.

Для определения среднего объема исследуемого озера необходимо воспользоваться формулой (5).

После получения значения о среднем объеме исследуемого озера, можно перейти к определению объема и уровня озера 3 % обеспеченности.

Поскольку по оз. Шедока известны статистические характеристики, они будут применены для оз. Крытого, поскольку условия формирования объема сходны для этих водных объектов.

В табл. 3 указаны ординаты аналитической кривой трехпараметрического гамма распределения. Исходя из данных табл. 3 объем оз. Крытое 3 % вероятности превышения составляет 1 063 423 м³.

Таблица 3
Ординаты кривой распределения

<i>P, %</i>	<i>C_v=0,3</i>	Объем оз. Крытое заданной вероятности превышения
0,001	2,63	1 726 421
0,01	2,38	1 562 313
0,03	2,26	1 483 540
0,05	2,2	1 444 154
0,1	2,11	1 385 075
0,3	1,97	1 293 175
0,5	1,9	1 247 224
1	1,79	1 175 017
3	1,62	1 063 423
5	1,53	1 004 344
10	1,4	919 007
20	1,25	820 542
25	1,19	781 156
30	1,14	748 335
40	1,06	695 820
50	0,977	641 336
60	0,903	592 760
70	0,826	542 214
75	0,785	515 301
80	0,741	486 417
90	0,632	414 866
95	0,548	359 726
97	0,498	326 904
99	0,41	269 138

Недостатки

Несмотря на увеличение территории использования формулы (2), она не лишена ограничений. На момент написания данной работы, не были проведены никакие исследования, связанные с проверкой работоспособностью расчетного метода.

Ниже перечислены очевидные недостатки и ограничения использования расчета.

– Поскольку в оригинальной формуле существовало ограничение использования формулы, при котором коэффициент β не должен быть 250 и более, подобное ограничение сохранилось и в обновлении.

– На момент написания работы нет представления о том, на каком удалении от озера аналога можно использовать расчетный метод. Также нет представления о закономерностях движения воды в разных гидрогеологических структурах. Предполагается, что при нахождении исследуемого и озера аналога в однотипных физико географических условиях и гидрогеологических структурах подобный расчет имеет место быть даже на сравнительно большом удалении.

– Использование предложенного расчетного метода обязывает гидролога получить данные об объеме нескольких водных объектов, что подразумевает полевые выезды на озера, их детальные промеры, а также получение информации о минимальных и минимальных отметках на всех озерах.

– Остается открытым вопрос о том, стоит ли учитывать объем воды, заключенный во льду в конце зимы.

Список литературы

1. СП 33.101-2003. Определение основных гидрологических характеристик. М. : Госстрой России, 2004.

УДК 556.06

Прогнозирование речного стока с помощью комплекса GISMETEO.HYDRO

Н. С. Ясинский (jasinskiy@gismeteo.com)¹, М. А. Гриненко¹, А. Я. Полунин²,
Е. А. Васильева¹

¹ООО «НПЦ «Мэн Мейкер», Москва

²УГМС Центральный, Москва

Аннотация. Представлена методика и результаты испытаний прогностической системы GISMETEO.FLOW в составе комплекса оперативного учета стока GISMETEO.HYDRO для рек ЕТР, Восточной Сибири и Черноморского побережья.

Ключевые слова: речной сток, гидрологические прогнозы.

Введение

По данным ансамблевого климатического прогноза 2/3 земного шара в 21 веке станет более влажной и испытает рост среднегодовых осадков. В тех регионах, которые станут более влажными, возрастет и их изменчивость, в среднем на 5 % на каждый градус потепления, а также абсолютные значения экстремальных осадков [9]. Исследователями выявлен рост интенсивности осадков в сезонном срезе в 1.5 раза и в годовом до 2 раз в Приднестровье [6], увеличение сумм осадков холодного периода выявлено и на Дальнем Востоке РФ [5]. Указанная динамика количества и интенсивности осадков неизбежно вызывает глобальные изменения режима рек. В. В. Попова подтверждает преимущественное влияние изменений снегонакопления и продолжительности залегания снежного покрова на годовой сток рек ЕТР и Западной Сибири. При этом отношение жидких осадков к твердым увеличивается на 5 %, а рост жидких осадков в теплый период с 2000-х годов перекрывается ростом температур и интенсивности солнечной радиации, что приводит к некоторому сокращению стока Волги и Северной Двины [7]. Все эти изменения накладываются на местные особенности, в частности для горных районов рост интенсивности солнечной радиации должен приводить к

увеличению вклада экспозиции склонов в речной сток. Возможные последствия возрастающей интенсивности летних осадков со всей очевидностью показали катастрофические паводки в г. Сочи в июле 2022 г.

Попытки создать удобную и универсальную систему учета, прогнозирования стока рек, раннего оповещения населения о наводнениях для территории РФ сталкиваются с разнообразием условий формирования стока и режимов рек. Если для крупных рек с межзональными бассейнами может быть целесообразным детальное описание водосбора, многоуровневая концепция почвенных пуль и наличие нескольких этапов русловой трансформации, то например для рек побережья г. Сочи и Краснодарского края можно не описывать детально процессы формирования стока, достаточно модели реакции стока на осадки [4].

Материалы и методики исследования

В ООО «НПЦ «Мэп Майкер» был разработан комплекс GISMETEO.HYDRO, включающий систему серверных приложений, баз данных для получения и обработки оперативной информации и настольное приложение для просмотра данных и управления расчетами [8]. В основе расчетных алгоритмов комплекса лежат рекомендации ГГИ по оперативному учету стока и руководящий документ по обработке данных наблюдений [1; 2].

В задачи комплекса входит расчет оперативных расходов воды и притока в водохранилище, построенный на зависимостях расход-уровень и поправочных коэффициентах, которые рассчитываются в зависимости от фазы водного режима. Настольное приложение включает редактор кривых связи расход-уровень для их автоматического и ручного построения, настройки расчета поправочных коэффициентов для периодов ледостава и открытого русла методом оптимальной экстраполяции, настройки расчета поправок для переходных весеннего и осеннего периода, настройки расчета отклонений для периода зарастания при его наличии у данной реки.

Среди новых решений, внедренных нами в практику оперативного учета стока можно перечислить усовершенствованный вид комплексного графика, единое графическое поле для ручного, автоматического построения кривых связи расход-уровень и их экстраполяции, ручной построитель кривых автокорреляции для периодов открытого русла и ледостава, расчет притока в водохранилище с учетом данных приходящих в базу данных задним числом, что обеспечивает наибольшую точность расчета. Существенно облегчает работу с комплексом система задач, в которую сводятся регулярные и разовые задачи, таким образом, пользователь видит их в едином пространстве, что исключает пропуски в рассчитываемых характеристиках и существенно снижает количество допускаемых пользователем ошибок.

Оперативные гидрологические и метеорологические данные для АРМ Гидролога поступают в реальном времени из базы данных ГИС Метео и ЦСДН. Используется режимная гидрология, данные которой, могут быть импортированы из файлов комплекса РЕКИ-РЕЖИМ. Если в работе использовался старый АРМ

Гидролога, то накопленные данные (формат MS Access) так же могут быть импортированы.

С целью обеспечения пользователей краткосрочными прогнозами стока нами была разработана интегрированная с комплексом прогностическая система GISMETEO.FLOW. В ее основу положена предобработка данных рельефа, постобработка прогноза глобальных атмосферных моделей, балансовая модель формирования стока и модель трансформации стока.

Глобальные модели атмосферы в последние годы активно развиваются, сгущается расчетная сетка, укрупняется временной масштаб прогнозов, растет количество прогнозируемых параметров. Это позволяет уйти от традиционного для гидрологии использования данных метеостанций по температуре и осадкам, что должно повышать точность прогнозов, конечно при условии, что сами модели атмосферы дают приемлемый прогноз. В GISMETEO.FLOW использовались данные о температуре, осадках, испарении, температуре почвы, прямой солнечной радиации, фазе осадков, относительной влажности воздуха из модели GFS с разрешением сетки 0,25 градуса. Расчет осуществлялся в соответствии с дискретностью и заблаговременностью прогноза атмосферной модели – каждые 3 ч, с заблаговременностью до 72 ч.

Обработка рельефа включает подготовку гидрологически связной поверхности, построение аккумуляции по ячейкам, построение речной сети, выделение водосбора и субводосборов. Затем происходит коррекция и перенумерация субводосборов, поскольку этого требует блок трансформации. Также используются данные о расположении покрытых лесом и свободных участков.

Формирование стока включает снегонакопление, расчет водоудерживающей способности снега, расчет снеготаяния, инфильтрации с учетом льдистости почвы, балансовые расчеты.

Модель трансформации стока существует в системе в двух вариантах. Первый вариант и результаты его испытаний подробно описаны в материалах прошлогодних конференций [3]. Была описана модель с аналитическим решением системы уравнений для участков речной сети, для каждого из которых зависимость объема воды в русле от расхода задавалась трехзвенной ломаной. В этой работе мы использовали вторую модель, основанную на уравнении кинематической волны. Связь площади сечения потока и расхода воды в этом случае задается формулой:

$$A = \alpha Q^\beta,$$

где $\alpha = \left(\left(\frac{n}{I^{0.5} R} \right)^{2/3} \right)^\beta$, $\beta = 0,6$ (калибруемый параметр), I – уклон, R – гидравлический радиус. Расчет трансформации частично основан на подходе, реализованном в гидрологической модели LISEM [11].

Результаты и обсуждение

На первом этапе была проведена калибровка моделей на водосборе р. Мокша, г. Темников. Рассчитанные моделью расходы воды сопоставлялись с измеренными расходами и оперативными, рассчитанными комплексом GISMETEO.HYDRO.

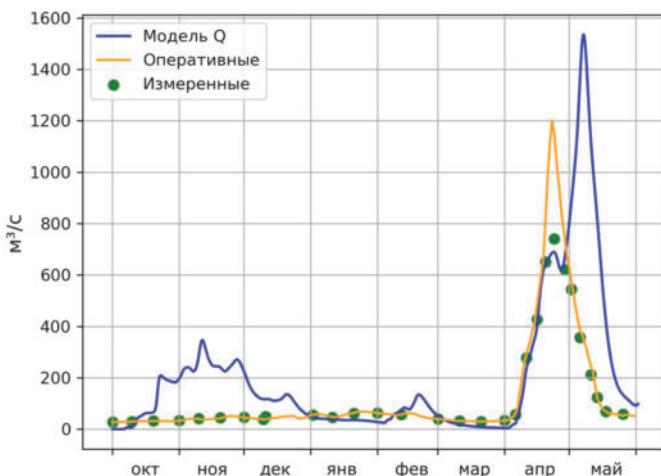


Рис. 1. Прогноз расходов р. Мокши, г. Темников на данных реанализа в 2016–2017 г.

Причина отклонений предмеженного стока, рассчитанного моделью в 2016 г., может быть связано с различиями в описании атмосферных осадков данными станций и атмосферными моделями, между тем в октябре даже на станциях осадки наблюдались. Наблюдается некоторое отставание максимальных расходов и их завышение, однако следует помнить о том, что сравнение происходит с данными, полученными на основе измерений уровня дважды в сутки, а дискретность модели составляет 3 ч.

На следующем этапе испытания были проведены для водосбора р. Олекма, г. Куду-Кюель (рис. 2). Расчет был произведен для трех створов, замыкающих сопоставимые по площади части водосбора. В данном случае система работала в режиме прогноза в реальном времени. Были получены прогностические расходы воды для периода весеннего половодья. К сожалению, мы не имели возможности сопоставить их с реальными расходами, поскольку по данной реке не имеется измеренных и режимных расходов. Однако по величине результаты соответствуют многолетним данным (средний из максимальных за год расходов 8640, наибольший 22 400 м³/с), в 2021 г. по данным интерактивного справочника о режиме и стоке рек годовой сток на данном посту превысил многолетний максимум, норма стока была превышена на 75 % [10; 12].

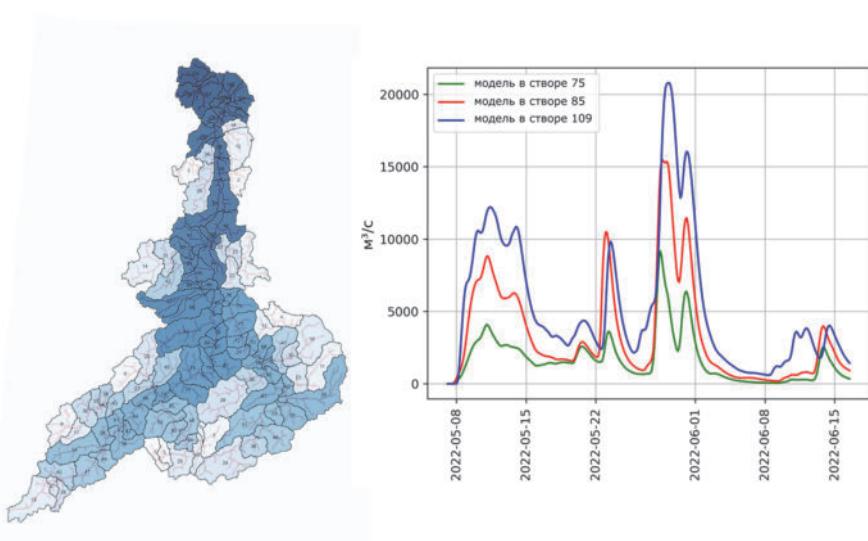


Рис. 2. Прогноз расходов р. Олекма, с. Кудук-Юель в 2022 г.

Следующим шагом были испытания модели для полугорных рек. Паводки на таких реках развиваются молниеносно, поэтому, как уже было сказано, на первый план выходит не точное моделирование процессов на водосборе, а правильная формализация реакции на осадки. Схема модели для горных и полугорных рек также отличается пространственным подходом. В силу больших перепадов рельефа при интерполяции узлов сетки или данных метеостанций водосбор разбивается на высотные зоны, которые накладываются на выделенные субводосборы. Это позволяет использовать уточненную интерполяцию температуры и осадков с использованием высотных градиентов.

На прогностических данных были получены расходы воды катастрофических паводков в районе г. Сочи для р. Сочи и р. Бзугу (рис. 3).

Расходы также приводятся для трех створов, замыкающих сопоставимые по площади части водосбора. Наблюденных расходов и уровней воды для р. Бзугу не было получено, однако уровни воды р. Сочи показали, что по срокам наступления модельные паводки существенно опережают реальные. После анализа распределения осадков было выяснено, что модель GFS с данным разрешением сетки не может адекватно отразить распределение осадков для таких небольших водосборов с горным рельефом в верхней их части.

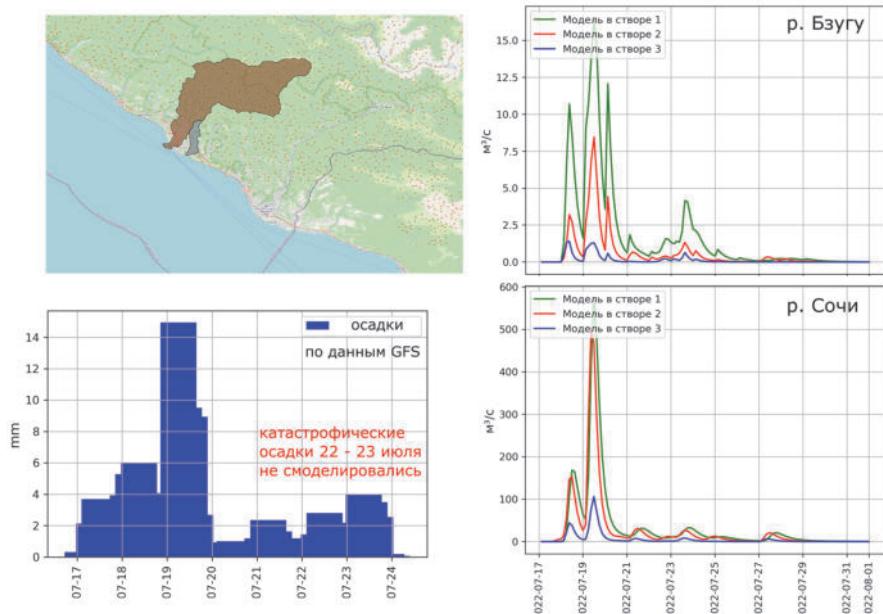


Рис. 3. Прогноз катастрофических паводков р. Сочи и р. Бзыг в июле 2022 г.

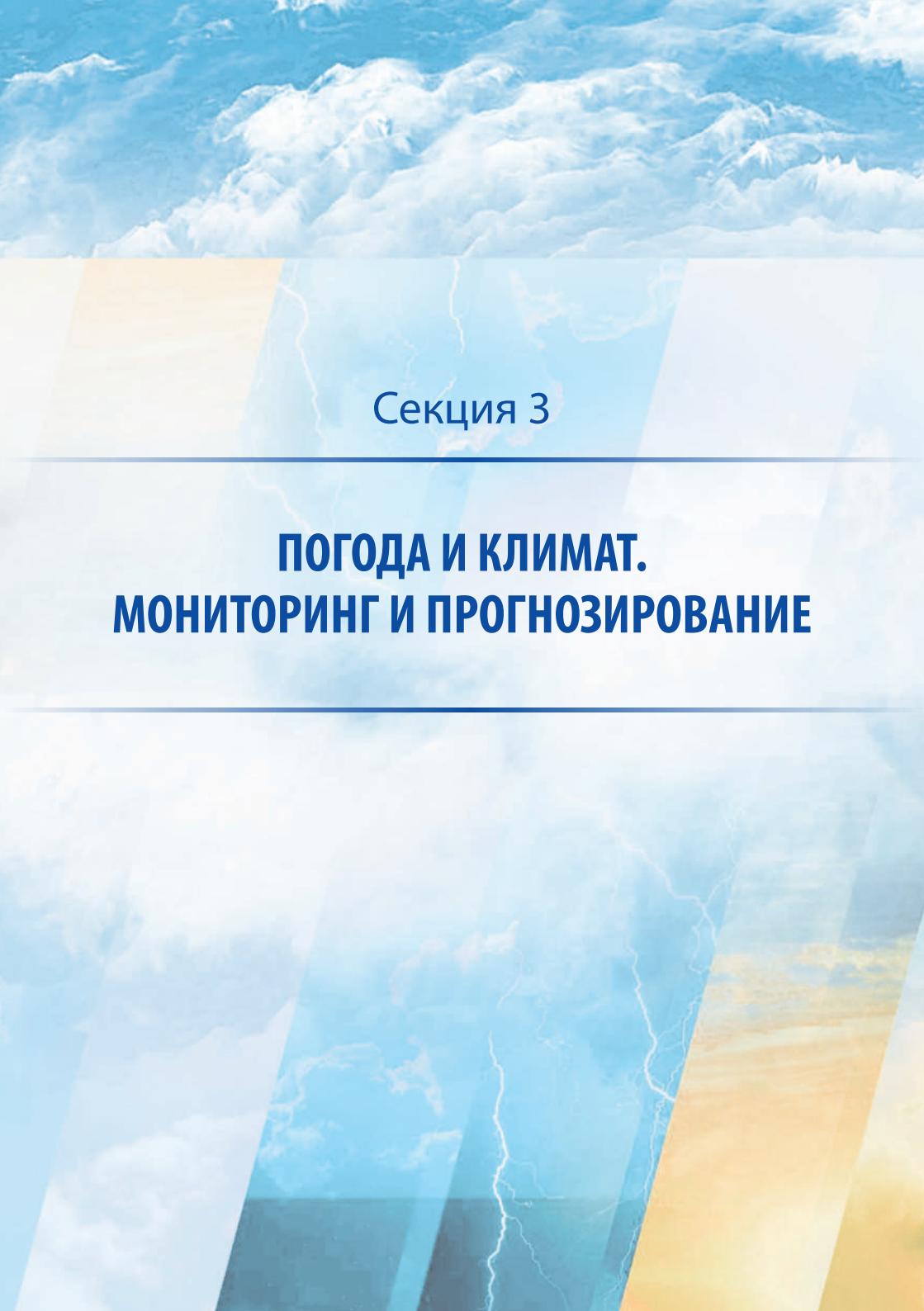
Заключение

Описанные комплекс оперативного учета стока и прогностическая гидрологическая система призваны обеспечить бесперебойную обработку гидрологических данных, расчет оперативных расходов и притока воды в водохранилища, подготовку краткосрочных прогнозов расходов воды и других характеристик водного режима. Это должно обеспечиваться взаимным обменом данными между GISMETEO.HYDRO и GISMETEO.FLOW, поскольку, к примеру, оперативные данные о стоке могут быть использованы для быстрой докалибровки моделей, а прогностические данные моделей могут применяться для прогноза притока воды в водохранилище с большей заблаговременностью. В настоящий момент требуются дополнительные испытания системы с привлечением данных за более длительные периоды, доработка методики интерполяции параметров атмосферных моделей, подаваемых на вход для рек в горных областях, автоматизация работы системы на всех уровнях.

Список литературы

1. Р 52.08.872–2018. Оперативный учет стока на водотоках. Методы обработки наблюдений за уровнями и расходами воды. 2018.
2. РД 52.08.915–2021. Обработка и обобщение данных наблюдений за стоком воды на реках и каналах при подготовке справочных изданий водного кадастра. 2022.

3. Ясинский Н. С., Полунин А. Я. Разработка компоненты программного комплекса GISMETEO.HYDRO, реализующей автоматизированную систему прогнозирования расходов весеннего половодья на основе совместного использования данных метеорологических моделей и модели формирования стока. СПб., 2020. С. 439–444.
4. Прогнозирование уровней воды на реках Краснодарского края с использованием методов машинного обучения / П. А. Белякова [и др.] // Водные ресурсы. 2022. № 1 (49). С. 13–26.
5. Боброва Д. А., Казаков А. И., Шевченко А. И. Современная динамика количества твердых осадков и стока весеннего половодья на реках Сахалина // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022. № 2 (27). С. 221–232.
6. Мунтян А. Н., Колъянко В. В., Еришов Л. А. Динамика интенсивности осадков в Приднестровье за период 1959–2017 гг. // Вестник Приднестровского университета. 2019. № 2(62). С. 114–120.
7. Попова В. В. Современные изменения климата в крупных речных бассейнах на западе России: региональная структура и связь с глобальными тенденциями. Екатеринбург : [б. и.], 2021. С. 94–103.
8. Ясинский Н. С., Гриненко М. А., Васильева Е. А. Программный комплекс GISMETEO.HYDRO как инструмент оперативного прогнозирования стока в различных отраслях хозяйства. М. : Пере, 2021. С. 458–467.
9. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world / W. Zhang [и др.]. // Science Advances. 2021. № 31 (7). С. eabf8021.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики / под ред. А. В. Шестакова. Л.: Гидрометеоиздат, 1967.
11. OpenLISEM. Multi-Hazard Land Surface Process Model. Documentation and User Manual. 2018.
12. Реки и озера России. URL: <http://hydrolare.ru> (дата обращения: 10.11.2022)



Секция 3

ПОГОДА И КЛИМАТ. МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

УДК 551.345

Развитие сети геокриологического мониторинга Магаданской области: первые результаты 2021–2022 гг.

Д. А. Абрамов (dmitrii.abramov@student.msu.ru)¹, О. М. Макарьева (o.makareva@spbu.ru)², А. А. Землянскова (anastasiazemlanskova@gmail.com)², А. А. Осташов (andrey.ostashov@gmail.com)², Н. В. Нестерова (nnesterova1994@gmail.com)^{2,3}

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

³Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

Аннотация. Для круглогодичного мониторинга криолитозоны в Тенькинском городском округе Магаданской области в 2021–2022 гг. пробурены и оборудованы девять термометрических скважин глубиной до 15 м. Скважины расположены на высотах от 618 до 1182 м в характерных горных ландшафтах. Ведется непрерывный 4-часовой мониторинг температуры грунта на различных глубинах. Получены данные о среднегодовой температуре пород, глубине сезонного оттаивания/промерзания, амплитуде температур на поверхности пород, а также глубина нулевых годовых амплитуд. Глубина сезона оттаивания изменяется от 0,9 до 2,6 м, температура на глубине нулевых годовых амплитуд от $-0,1$ до $-3,8$ °C. На основе полученных данных и опыта проведения работ планируется дальнейшее развитие сети геокриологического мониторинга в Магаданской области, являющейся одним из стратегически важных регионов России по добыче драгоценных металлов.

Ключевые слова: криолитозона, многолетнемерзлые породы, мониторинг, температурный режим пород, слой сезонного оттаивания.

Введение

Магаданская область (МО) – один из стратегически важных регионов, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП), по добыче россыпного золота и количеству прогнозных ресурсов коренного золота занимает первое и второе место в России соответственно [5]. Для обеспечения инженерно-хозяйственной деятельности в МО необходимо изучение криолитозоны, так как с ее трансформацией может быть связан значительный ущерб для инфраструктуры региона [8; 9].

Для оценки состояния и динамики ММП, а также построения прогнозов и оценки геокриологических рисков, основной характеристикой является температура грунта. Наиболее востребованный метод для прогнозирования изменения криолитозоны – установка режимных наблюдений на термометрических скважинах [3]. Тем не менее, для регионов криолитозоны России сеть наблюдений за температурой грунтов очень разрежена [6], а ряды данных имеют разную продолжительность. Геотехнический мониторинг, выполняющийся на предприятиях, не учитывает фоновые условия состояния ММП, что не позволяет в полной мере обеспечить надежность прогнозов и рекомендаций по строительству и эксплуатации инженерных сооружений.

В связи с развитием государственной сети геокриологического мониторинга Росгидромет планирует оборудовать не более трех термометрических скважин глубиной 30 м в населенных пунктах Сусуман, Усть-Омчуг и Омсукчан. При успешной реализации планов Росгидромет первые данные о температуре ММП будут получены только в 2026 г. На территории МО расположена сеть скважин Северо-Восточной мерзлотной станции ИМЗ СО РАН, сведения о данных по двум действующим скважинам опубликованы в глобальной сети мониторинга криолитозоны (Global Terrestrial Network for Permafrost) [7]. На метеорологических станциях Росгидромет МО в г. Магадан и г. Сусуман ведутся наблюдения за температурой грунтов до глубины 3,2 м. С учетом разнообразия природных условий региона такое количество скважин является недостаточным. (рис. 1)



Рис. 2. Схема расположения наблюдательных пунктов в Магаданской области

Коллективом авторов в 2021–2022 гг. на территории Тенькинского городского округа МО были оборудованы 9 термометрических скважин глубиной до 15 м. Получены первые данные о распределении температуры грунта в различных ландшафтных условиях для горного района МО, необеспеченного такими данными в последние десятилетия. Их первичный анализ и публикация являются целью работы.

Территория исследования

Термометрические скважины расположены в непосредственной близости от Тенькинской трассы в пределах Тенькинского городского округа Магаданской области: одна из них в долине р. Бускэчэн (приток р. Бохапча, правый приток р. Колымы), четыре – в бассейне р. Анмангынды (приток р. Детрин, правый приток р. Колымы), четыре – в бассейне р. Кулу.

В физико-географическом отношении Тенькинский район располагается в переделах Верхне-Колымского нагорья на западе Магаданской области. Площадь района составляет 35,6 тыс. км². Рельеф горный, расчлененный многочисленными водотоками, характеризуется большими перепадами абсолютных высот – до сотен метров.

Климат района – континентальный. Средняя годовая температура воздуха по данным метеостанций Усть-Омчуг (1946–2020 гг.) и Колымская водно-балансовая станция (КВБС) (1949–2014 гг.) составляет – 9,8 °C и –11,3 °C, средняя температура наиболее холодного месяца (январь) –33,4 °C и –34,0 °C, средняя температура воздуха наиболее теплого месяца (июль) +14,6 °C и +13,6 °C соответственно. Средние месячные значения температуры воздуха отрицательны в течение семи месяцев с октября по апрель включительно. Количество осадков в пос. Усть-Омчуг и на КВБС составляет 341 и 354 мм в год соответственно. В холодный период года выпадает около 30–40 % осадков. Снежный покров формируется к середине октября и разрушается в конце мая.

Методика выполнения исследований

Бурение скважин проводилось в два этапа. В конце августа 2021 г. были пробурены 4 скважины глубиной от 5 до 15 м в бассейне р. Анмангында (табл. 1). Бурение проводилось ударным способом на установке УРБ 2А2М без извлечения керна.

Таблица 1

Характеристики скважин

№	Название	Глубина, м	Высота, м	Ландшафт
Период наблюдения 01.10.2021 по 30.09.2022				
1	Сопка	15	1027	Тундра
2	ГП-2	15	712	Лиственничное редколесье
3	Наледь	13,1	744	Наледная поляна
4	Солонцовский	5	803	Лиственничное редколесье
Период наблюдения 1–30.09.2022				
5	Перевал Кулу	15	1170	Лиственничное редколесье
6	Поселок Кулу	15	618	Техногенный
7	Гольцы	15	1182	Гольцовский
8	«Верхний»	15	961	Лиственничное редколесье
9	Бускэчен	15	978	Лиственничное редколесье

Второй этап бурения еще пяти скважин произведен в июле 2022 г. с помощью буровой установки с отбором и описанием керна. Глубина всех скважин, оборудованных на втором этапе, составила 15 м.

Все скважины обсажены пластиковой трубой, с внешней стороны засыпаны грунтом, а сверху изолированы от проникновения атмосферного воздуха и влаги. Для наблюдения используются логгеры фирмы «Импеданс» (г. Москва). Интервал измерения температуры составляет 4 ч. Восемь из девяти скважин имеют глубину 15 м.

Глубина расположения датчиков на 5 и 15-метровых термокосах представляет собой следующую схему: от поверхности до глубины 0,5 м датчики расположены через 0,1 м, далее до глубины 1,5 м через 0,25 м, от 1,5 до 5 (15) м через 0,5 м, дополнительный датчик расположен на глубине 4,75 (14,75) м. Расположение датчиков и устройство скважины «Наледь» глубиной 13 м определяется ее местом положения в пределах наледной поляны Анмангындинской наледи, где толщина льда по историческим данным может достигать 2 м. Поэтому над скважиной установлен оголовок высотой 2,66 м. Используется коса длиной 15 м, описанная выше.

В скважине «Солонцовский» дополнительно используется логгер компании Onset computer corporation (HOBO Pro series, 4 канальный) с терморезисторными датчиками (точность измерения 0,15 °C). Датчики расположены на глубинах 0,5, 1,0, 3,0 и 5,0 м.

Также для интерпретации получаемых данных необходимо учитывать тип местности, на котором проводятся исследования, в геокриологии такой тип местности принято называть ландшафтом. Рельеф, экспозиция, тип растительного покрова, наличие вблизи скважины антропогенных или водных объектов, все это и не только существенно влияет на температурный режим пород. Ниже приведены описания расположения 4 скважин, по которым получены ряды данных о температуре пород за гидрологический год.

Скважина «ГП2» расположена на субгоризонтальной поверхности, сложенной, делювиальным крупнообломочным материалом с песчано-глинистым заполнителем неопределенной мощности, подстилаемым песчано-глинистыми сланцами. Ландшафт представляет собой угнетенное лиственничное редколесье с подростом из карликовой бересклета, кедрового стланика и злаковой растительности. Мощность почвенно-растительного слоя 0,2 м. Поверхность сильно увлажнена.

Скважина «Наледь» расположена на наледной поляне, в 500 м от одной из основных проток р. Анмангында. Растительность представлена редкими кустарниками голубики и карликовой ивы. Мощность аллювия по данным геофизики более 50 м, представляет собой гравийно-галечниковые отложения с супесчаным заполнителем (рис. 2, Б).

Скважина «Солонцовский» расположена в 50 м к югу от русла ручья Солонцовский (правый приток р. Анмангында) на субгоризонтальной поверхности. Породы разреза представлены делювиальными накоплениями крупнообломочного материала с песчано-суглинистым заполнителем, их мощность не определена. Ландшафт представляет собой лиственничный лес (высотой до 10 м) с кедровым

стлаником и подростом из голубики и карликовой бересклета (рис. 2, *B*). Мощность почвенно-растительного слоя 0,2 м.

Скважина «Сопка» расположена на повышении рельефа в верховьях бассейна р. Амнанганыды. Ландшафт представляет собой ровную гольцовую поверхность, заполненную осыпным щебнистым материалом, с островным распространением мохового покрова, представленного ягелем (рис. 2, *Г*). Почвенно-растительный слой отсутствует.

Результаты исследований

К настоящему моменту получены первые ряды данных о температуре грунтов за круглый год по 4 из 9 скважин (рис. 2), а также распределение температуры грунта по глубине к окончанию теплого сезона 2022 г. на пяти новых скважинах. Полученные данные позволяют оценить некоторые характеристики ММП данной области, такие как среднегодовая температура пород T_{cp} , амплитуда температур на поверхности пород A_0 , глубина ξ и скорость сезонного оттаивания/промерзания, глубина нулевых годовых амплитуд H_0 . Амплитуда температур на поверхности пород A_0 определяется с учетом мощности растительного покрова на данном типе местности. Критерием для оценки глубины нулевых годовых амплитуд H_0 является неизменность среднемесячной температуры датчика с погрешностью ($\pm 0,1$ °C). Глубина сезонного оттаивания определяется по максимальной мощности слоя с положительными температурами, который на данной территории достигается в сентябре. Аналогично, глубина сезонного промерзания фиксируется по слою с отрицательными температурами в конце периода промерзания, т. е. в мае. Среднегодовая температура пород T_{cp} представляет собой температуру пород на глубине нулевых годовых амплитуд H_0 .

Данные характеристики представлены в табл. 2.

Таблица 2
Характеристики температурного режима пород в исследуемых скважинах

Скважина	T_{cp} , °C	A_0 , °C	ξ , м	H_0 , м	Начало-конец оттаивания, месяц		Начало-конец промерзания, месяц		
Сопка	-3,2	12	1,3	13,5	VI	IX	X	X	
ГП2	-1,8	10	0,9	11,5	V	IX	X	X	
Наледь	-0,1	—	2,6	—	VI	VIII	X	II	
Солонцовский	—	—	2,6	н/д	VI	VIII	X	V	
Перевал Кулу	-2,4	—	1,3	н/д	н/д				
Поселок Кулу	-2,5	—	1,7	н/д	н/д				
Гольцы	-3,8	—	1,9	н/д	н/д				
«Верхний» (КВБС)	-0,6	—	2,6	н/д	н/д				
Бускэчен	-0,6	—	1,6	н/д	н/д				

Примечание: н/д – недостаточно данных.

Скважина «Наледь» интересна своим расположением в районе наледеобразования. Сложность формирования температурного режима пород наледных полян заключается в неоднородности формирования в них стока. Подземные

воды, разгружающиеся в данной области и формирующие саму наледь, имеют температуру близкую к нулю вследствие непосредственной близости многолетнемерзлых пород, которые имеют на территории исследования сплошное распространение [2]. И наоборот, ММП, находящиеся в разрезе наледной поляны, имеют высокую температуру ($0\ldots -0,3$ °C). Полученные данные (рис. 2) позволяют говорить, что кровля ММП в данной конкретной точке залегает на глубине 8,5 м. Промерзание начинается в октябре как с поверхности земли, так и с кровли ММП, и заканчивается в ноябре на глубинах 4 и 5 м соответственно. На глубинах 4–5 м предположительно находится растягивающий канал фильтрации подземных вод в аллювии, на кровле которого вплоть до июля существует козырек сезонно-мерзлого слоя ξ (СМС), изолирующий нижележащую толщу от проникновения поверхностных вод. Когда данный фрагмент СМС вытаивает в августе, поверхностные воды обеспечивают конвекцию тепла на глубины 2–4,5 м, из-за чего самая высокая температура пород на данных глубинах достигается не в августе, как следовало предположить, а в сентябре.

В скважине «Солонцовский» глубиной 5 м наблюдается таликовая зона по всей вскрытой мощности (рис. 2). Связано это может быть с близостью ручья Солонцовский (150 м) и его впадением в русло р. Аммантында в радиусе 1 км от скважины. Предположительно, в данной области может образовываться таликовая ванна, что распространено в криолитозоне Северо-Востока РФ [1]. Минимальная температура пород на глубине 5 м достигается в мае (0,8 °C). Предполагается наличие кровли ММП в ближайших 10 м разреза, не вскрытых скважиной. Фронт промерзания формируется с поверхности земли в октябре, максимальной мощности ξ (2,6 м) СМС достигает в мае. Наблюдение за данной скважиной важно для большего понимания таликовых зон в условиях сплошного распространения ММП. Планируется дальнейшее изучение площадки с бурением более глубокой скважины и использованием геофизических методов.

Скважины «Сопка» и «ГП2» находятся в зоне распространения многолетнемерзлых пород. Различие в высотном расположении (1027 и 712 м соответственно) и типах местности объясняет контраст в характеристиках ММП этих скважин. Так, на «Сопке» практически отсутствует растительный покров, тогда как на «ГП2» он более развит и его теплоизоляционные свойства не дают проникать солнечной радиации в теплый период года. Также свою роль играет влажность пород: в скв. «ГП2» больше тепла расходуется на фазовые переходы «вода/лед». По этой причине, а также из-за большей величины A_0 (12 °C) в «Сопке» порода оттаивает на большую глубину ($\xi = 1,3$ м) в отличие от скв. «ГП2» ($\xi = 0,9$ м) (рис. 2), хотя оттаивание на «ГП2» начинается на месяц раньше. Ранний период начала оттаивания может быть связан с тем, что на «Сопке» выпадает гораздо больше снега, который сохраняется и в теплый месяц.

Таким образом, в пределах одного района геокриологические условия существенно отличаются. Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что оптимальной для термометрических скважин в данном районе является глубина 15 м, так как она позволяет гарантированно установить границу проникновения

поверхностных колебаний температуры, т. е. установить глубину нулевых годовых амплитуд. Данный параметр крайне важен при строительстве инженерных сооружений на мерзлых грунтах. Дальнейший мониторинг и развитие сети позволят проследить динамику, выявить тренды изменения температурного режима, а также даст возможность делать прогноз изменения криолитозоны района исследований.

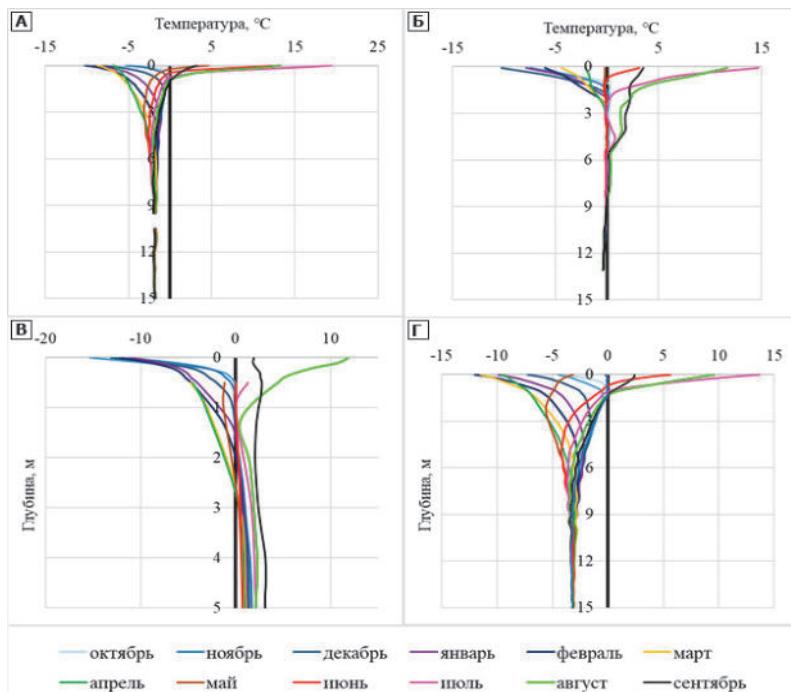


Рис. 2. Графики изменения температуры грунта в скважинах за период 01.10.2021 – 30.09.2022: А) ГРП2; Б) Наледь; В) Солонцовский; Г) Сопка

Благодарности. Коллектив авторов искренне благодарит Главу Тенькинского городского округа Магаданской области Дениса Анатольевича Ревутского за помощь в проведении исследований и обеспечении работы научной группы на территории округа. Исследование выполнено при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект id 75295776), Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-35-80028) и Русского географического общества (проект «Водные ресурсы Северо-Востока в условиях региональных и глобальных изменений»).

Список литературы

1. Температурный режим и мощность массивов мерзлых пород в зоне влияния долинных талников Северо-Востока СССР / С. Н. Булдович, Л. С. Гарагуя, С. Ю. Пармузин, Г. С. Типенко // Геокриологические исследования. М. : Изд-во МГУ, 1991. С. 97–105.
2. *Михайлов В. М., Банцекина Т. В.* Об условиях, определяющих формирование пойменных талников, и некоторых закономерностях их распространения // Криолитозона и подземные воды Сибири. Ч. 2. Подземные воды и наледи. Якутск : Изд-во СО РАН, 1996. С. 34–45.
3. *Павлов А. В.* Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли. 1997. Т. 1, № 1. С. 47–58.
4. *Павлов А. В.* Оценка погрешностей измерений температуры грунтов в неглубоких скважинах в условиях сплошной криолитозоны // Криосфера Земли. 2006. Т. 10, № 4. С. 9.
5. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Магаданской области от 14 янв. 2021 г. № 049-00016-21-00.
6. Вестник инженерных изысканий. URL: <http://izyskateli.info/2020/11/%EF%BB%BFoszdanii-sistemy-gosudarstvennogo-geokriologicheskogo-monitoringa/> (дата обращения: 23.10.2022).
7. GTNP.ARCTICPORTAL.ORG. URL: <http://gtnpdatabase.org/boreholes> (date of access: 23.10.2022).
8. *Anisimov O., Belolutschkaya M. A.* An assessment of the impacts of climate change and degradation of permafrost on the infrastructure in Russian North Regions. 2002. P. 15–23.
9. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost / D. A. Streletschiy [et al.] // Environ. Res. Lett. 2019. N 14. P. 025003.

УДК 551.510.42

Проверка геострофичности вариаций ветра на нейтральной верхней атмосфере в периоды geomagnитных бурь

А. А. Агальцов (aghaltsov@mail.ru)¹, Р. В. Васильев
(roman_vasilyev@iszf.irk.ru)^{1,2}

¹Иркутский государственный университет, Иркутск

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Аннотация. Статья посвящена проверке геострофичности вариаций ветра нейтральной верхней атмосферы в периоды геомагнитных бурь. Проведен анализ литературы с описанием возмущений циркуляции верхней атмосферы во время геомагнитных бурь и в спокойном состоянии. Выполнен первичный анализ данных о ветре и температуре верхней атмосферы, полученных при помощи интерферометра Фабри-Перо, и предпринята попытка проверки геострофичности ветра. Полученные данные представляют научный интерес для исследователей атмосферы Земли и солнечно-земных связей.

Ключевые слова: геострофический ветер, геомагнитная буря, солнечный ветер, интерферометр Фабри-Перо, нейтральная атмосфера.

Введение

Солнце служит основным источником не только жизни на нашей планете, но и двигателем, который заставляет перемещаться воздушные массы на Земле, нагревая разные участки атмосферы и поверхности планеты по-разному, образуя области с разным давлением воздуха. В этих областях появляется действующая

на воздушные массы сила градиента давления. Эта сила в балансе с силой Ко-риолиса вызывает стационарное течение воздуха – геострофический ветер.

Верхняя атмосфера Земли подвержена нагреву не только в результате прямого солнечного излучения, но и в результате действия геомагнитных бурь, которые нагревают обширные полярные области верхней атмосферы. Геомагнитные бури и повышенное солнечное ультрафиолетовое излучение нагревают верхние слои атмосферы Земли, заставляя ее расширяться. Процессы, схожие с описанными ранее барическими градиентами и геострофическими ветрами должны присутствовать и в верхней атмосфере полярных областей Земли.

Результаты исследования

Солнечный ветер, приходящий к Земле от Солнца, возмущает магнитное поле нашей планеты, что и приводит к нагреву атмосферы, что провоцирует движение воздушных масс. Солнечный ветер большей силы-геомагнитные бури возмущают магнитное поле еще больше, из-за чего на полюсах возникает полярное сияние. Увеличение давления солнечного ветра первоначально сжимает магнитосферу. Магнитное поле солнечного ветра взаимодействует с магнитным полем Земли и передает повышенную энергию в магнитосферу. Оба взаимодействия вызывают увеличение движения плазмы через магнитосферу (обусловленное увеличением электрических полей внутри магнитосферы) и увеличение электрического тока в магнитосфере и ионосфере. Изменение кольцевого тока, текущего над экватором, можно отслеживать по изменению магнитного поля. Это изменение характеризует динамику бури. Индекс, отслеживающий изменение магнитного поля, называется DST.

Поскольку во время геомагнитной бури происходит высыпание частиц и усиление токов в высокоширотной верхней атмосфере, то она должна нагреваться и формировать область повышенного давления, в которой по фундаментальным законам атмосферы должна формироваться антициклоническая циркуляция. Таким образом, в результате воздействия солнечного ветра потоки воздуха должны замыкаться в области близкой к полюсам (рис. 1). Зелеными стрелочками изображены потоки ветра, красными стрелочками – солнечный ветер.

Температурные градиенты и скорость ветра в верхней атмосфере можно измерить с помощью интерферометров Фабри-Перо адаптированных для астрономических наблюдений.

Интерферометр Фабри-Перо ведет наблюдения различных частей атмосферы на соответствующей длине волны. Поле зрения шириной около 2° направляется на север, юг и прямо над тем местом, где и находится сам интерферометр. Угол между точками зенита и севера или зенита и юга равен 45° . Точка замера температуры, находящаяся прямо над ним, располагается на высоте ≈ 250 км, расстояние на том уровне, где производят замеры между северной точкой и зенитом, и также между точкой зенита и южной ≈ 250 км, а на другом уровне, на котором может возникать свечение атмосферы в результате геомагнитных бурь ≈ 400 км (рис. 2). T(S)-южная температура в поле зрения интерферометра, T(Z)-температура в зените, T(N)-температура северная.

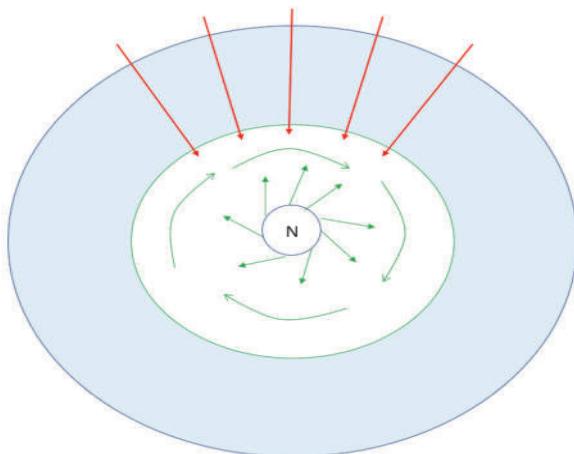


Рис. 1. Циркуляция атмосферы в следствии геомагнитной бури

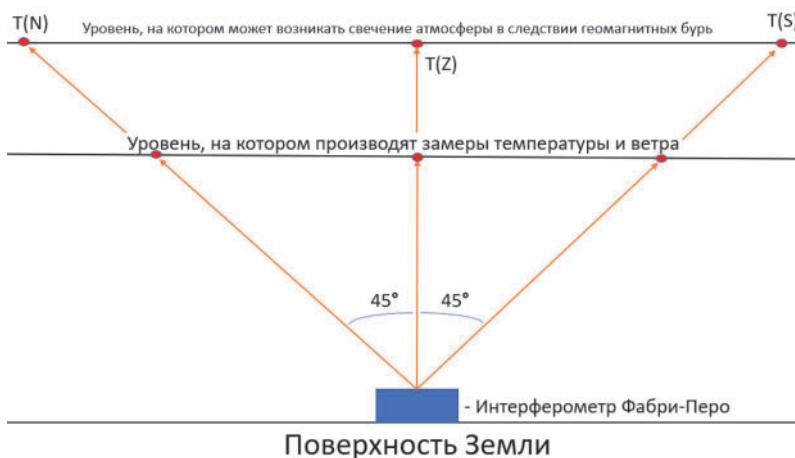


Рис. 2. Принцип действия интерферометра Фабри-Перо

На примере приведенных данных графика на (рис. 3) можно проанализировать, какой была температура атмосферы на высоте ≈ 250 км в период с 28.08.2022 по 05.09.2022. Красными точками отмечена температура, которую интерферометр фиксировал на северной части своего поля зрения, а фиолетовыми – прямо над собой. Почти во все дни с 28.08 по 04.09 температура держалась примерно на одном уровне, а 05.09 и северная, и температура в зените заметно повысились. Это связано с тем, что в этот день наблюдалась геомагнитная буря, которая спровоцировала нагрев верхних слоев атмосферы. Также в связи с этой бурей можно наблюдать изменение индекса кольцевого тока, с 28-го по 1-е

число он держался примерно в одном диапазоне значений, 2-го числа зафиксировано два скачка значений индекса, а 4-го и 5-го числа наоборот значительный спад индекса кольцевого тока.

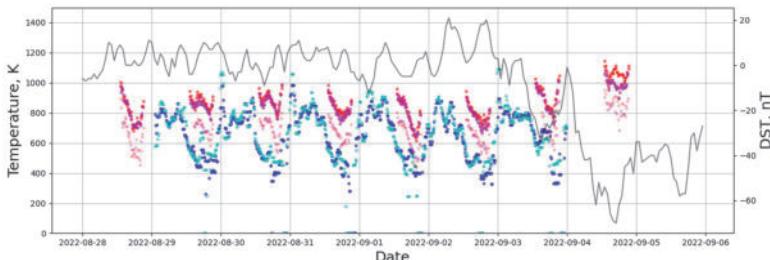


Рис. 3. Зафиксированные значения температур интерферометром Фабри-Перо в период с 28.08.2022 по 05.09.2022

На графике, приведенном ниже (рис. 4), можно проанализировать, какие ветры преобладали в данный период. Синими точками отмечен зональный ветер, который дул с запада на восток и обратно. А красными точками – меридиональный ветер, который дул с севера на юг. С 28.08 по 31.08 картина была неоднозначна, то сначала скорости ветров были небольшими и преобладал меридиональный ветер, то этот же ветер развивал значительные скорости в направлении севера, а зональный в сторону запада. Такая картина наблюдалась из-за неудачных погодных условий, связанных с полной или частичной облачностью. Но затем несколько дней направление стабилизировалось и меридиональный, и зональный ветра развивали всегда примерно одну и ту же скорость и перемещались по одному и тому же сценарию. Но 04.09 зональный ветер почти всегда имел восточное направление, иногда развивал очень большую скорость, а меридиональный имел южное направление и скорость до 100 м/с, в этот день также наблюдалась облачность. А 05.09 направление осталось тем же, но скорости увеличились еще больше, именно в этот день геомагнитная буря также повлияла на ветер, на высоте ≈ 250 км, как и на температуру. Индекс кольцевого тока с 28-го по 1-е число держался примерно на одном уровне. Второго числа зафиксированы два скачка, 3-го числа наблюдалось значительное понижение индекса, а 4-го числа значение индекса кольцевого тока опустилось еще ниже, 5-го числа также было довольно низкое его значение, но уже выше, чем 4-го числа, что также было связано с геомагнитной бурей.

Для соответствующих выводов нам понадобится формула оценки геопотенциала:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{gz' - gz}{\Delta x} = \frac{R \ln \frac{P_1}{P_0} (T_{cp} - T'_{cp})}{Dx}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения $\approx 9,81$ м/с²; z – высота в зените; z' – высота на южной или северной стороне; x – расстояние от точки в зените до южной или

северной точки замеров; R – газовая постоянная = 8,31 Дж/(моль·К); P_1 – давление на высоте ≈ 250 км; P_0 – давление на уровне Земли; T_{cp} – средняя температуре в слое воздуха над интерферометром в зените; T'_{cp} – средняя температуре в слое воздуха от Земли до высоты замеров южной или северной точки.

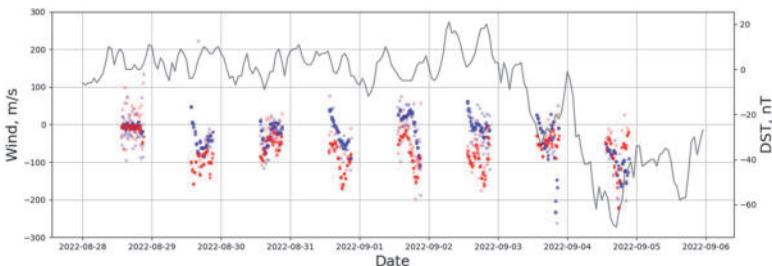


Рис. 4. Направление ветра в период с 28.08.2022 по 05.09.2022

Также нам будет нужна формула для оценки скорости геострофического ветра:

$$fU_g = \frac{-d\Phi}{dy}, fV_g = \frac{d\Phi}{dx}, \quad (2)$$

где f – широтная компонента; Φ – широта местности; y – координата по вертикали; x – координата по горизонтали; U_g – скорость геострофического ветра по вертикали; V_g – скорость геострофического ветра по горизонтали.

Можно оценить значение скорости геострофического ветра, который развивается при наблюдаемом локальном температурном градиенте в ночь с 22.09.04 на 22.09.05. Красными точками (см. рис. 3) показано поведение температуры в верхней атмосфере к северу от ИФП, сиреневыми показано поведение температуры в зените. Таким образом для температурного градиента 100 К / 250 км, с использованием формул (1) и (2) оценка скорости ветра составляет при логарифме давления на двух уровнях $\sim 1,76$ составляет 2,6 км/с. Наблюдаемое отклонение ветра от своего регулярного значения в этот момент не превышает 100 м/с. Таким образом, можно заключить, что геострофический баланс не является хорошим приближением для анализа возмущений ветра в верхней атмосфере во время геомагнитных бурь.

Данные, собранные в период с ноября 1981 по январь 1982 г. и в период между ноябрем 1982 по январь 1983 г. были усреднены по знаку В-компоненты и начальной функции массы, и построены в геомагнитных полярных координатах (магнитная широта и магнитное местное время) [2]. Внешний круг каждого полярного циферблата 40° широты. Поскольку было обнаружено (рис. 5), что нейтральные ветры в высоких широтах частично имитируют двухъячеичный характер ионной конвекции и в других работах указано, что геометрия картины ионной конвекции сильно зависит от направления и величины межпланетного

магнитного поля, было проведено несколько исследований для проверки чувствительности измеренной циркуляции нейтрального ветра к величине и ориентации межпланетного магнитного поля. Они использовали как данные с одной орбиты, так и усредненные данные из многих проходов динамического проводника 2 по орбитам над сложной сигнатурой многоклеточного потока плазмы северного полушария, а также отрицательный случай B_y , показывающий более классический паттерн двойных клеток.

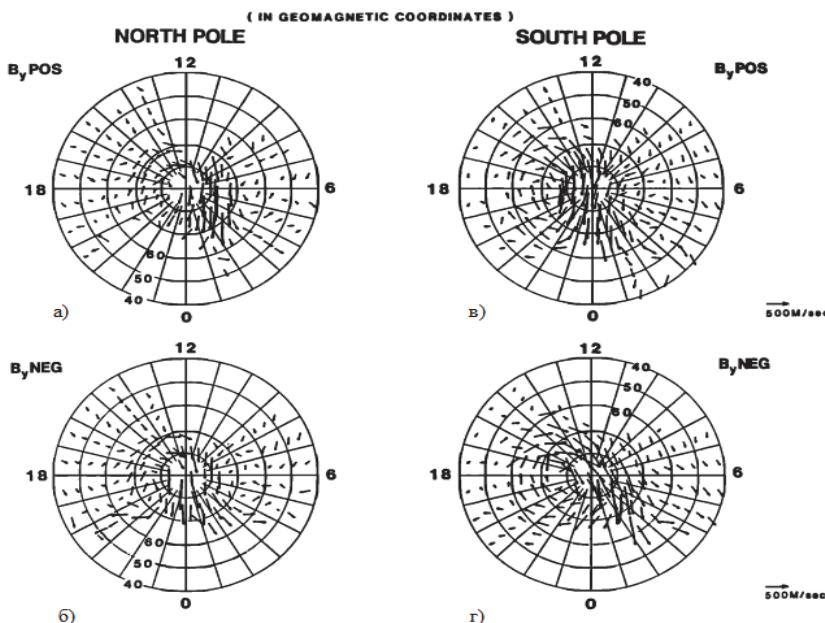


Рис. 5. Усредненные измерения термосферного нейтрального ветра для а) северного полюса, положительный, б) северного полюса, отрицательный, в) южного полюса, положительный, г) южного полюса, отрицательный

Нейтральные ветры демонстрируют исходные характеристики с дрейфами ионов в обоих случаях, хотя и с уменьшенными магнитудами. Хилис и др. (1986 г.) использовали дополнительные измерения динамического проводника ионосферных дрейфов, чтобы проиллюстрировать дальнейшую геометрию ионной конвекции для положительного B_y . Таким образом, измерения нейтрального ветра продемонстрировали четкие морфологические зависимости от ориентации межпланетного магнитного поля, и эти зависимости по своей природе аналогичны тем, которые наблюдались ранее для ионосферной конвекции. Идентификация и количественная оценка как больших, так и более тонких зависимостей

характера циркуляции нейтрального ветра от ориентации межпланетного магнитного поля были одним из самых замечательных результатов миссии, поскольку они ясно иллюстрируют сильную связь, которая наблюдается во всем околоземном пространстве Земли на всем пути от одного полюса Земли до другого полюса, солнечный ветер, проходящий через магнитосферу и ионосферу и саму нейтральную атмосферу. Такие зависимости, возможно, не казались бы интуитивно очевидными до начала миссии [1].

Заключение

Проведено оценочное исследование проверки геострофичности вариаций ветра на нейтральной верхней атмосфере в периоды геомагнитных бурь. Рассмотрены особенности ветра во время затишья в различные времена года, и при геомагнитных бурях на примерах различных исследований. Также была проведена проверка в зависимости от магнитной широты и местного времени в (верхних) северных широтах, средних широтах и южных высоких широтах.

Как уже было сказано выше воздушные потоки должны перемещаться от полюсов к экватору по спирали. Но после прихода солнечного ветра потоки воздуха замыкаются в области близкой к полюсам и далее к экватору не спускаются, а начинают двигаться по другой траектории, что, конечно же, влияет на геострофичность ветра. Также важно отметить, исходя из наших данных, что ветер на высоте примерно 250 км почти всегда дует в сторону Солнца, а во время геомагнитных бурь он дует в сторону противоположную местоположению Солнца.

Во время бурь в верхней атмосфере Земли туда приходят потоки повышенной энергии, которые приносят с собой частицы, влияющие на воздушные потоки. Становится понятно, что ветер в нейтральной атмосфере не может быть геострофическим, так как из-за этих частиц появляются коэффициент молекуллярной вязкости μ и ионное увлечение, которые тормозят воздушные потоки и меняют их направления.

Также с помощью физических формул мы проверили на нейтральной верхней атмосфере ветер на геострофичность в периоды геомагнитных бурь. Исследования показали, что в этот период ветер не является геострофическим, так как его скорость составила 2,6 км/с, что является слишком большим значением, и под понятие «геострофический ветер» не вписывается.

Список литературы

1. Kileen T. L., Roble R. G. Thermosphere dynamics Contributions from the first 5 years of the Dynamics // Reviews of Geophysics. 1988. Vol. 20. P. 346.

УДК 551.583

Циркуляционные факторы изменения климата Иркутской области

Е. П. Белоусова (elenapbel@rambler.ru)^{1,2}, С. Ж. Вологжина (svologzhina@gmail.com)¹, И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)¹, К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru)¹

¹Иркутский государственный университет, Иркутск

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Аннотация. Статья посвящена исследованию многолетней динамики циркуляционных условий на территории Сибирского сектора по типизации Б. Л. Дзерзевского во взаимосвязи с климатическими изменениями температурного режима на севере и юге Иркутской области. Рассчитывались аномалии средних месячных температур по данным метеорологических станций Иркутск и Ербогачен. Проанализирована внутригодовая динамика температурных аномалий, которая сопоставлялась с межгодовыми вариациями различных групп крупномасштабных форм атмосферной циркуляции с долготной и широтной составляющими. Отмечено резкое возрастание продолжительности долготной северной группы атмосферных процессов, что является характерной особенностью современного климата на территории Сибири и может проявляться в увеличении повторяемости процессов блокирования над Иркутской областью. Сделан вывод, что возросшая повторяемость процессов блокирования является причиной увеличения количества лесных пожаров в теплый период года и контрастности погодных условий в холодный период.

Ключевые слова: климат, циркуляция, типизация, аномалии, потепление, блокирование.

Введение

По данным [5] средняя глобальная температура воздуха у поверхности Земли на 1,2 °C выше, чем в доиндустриальную эпоху, а период 2011–2020 гг. считается самым теплым десятилетием за всю историю метеорологических наблюдений. В пространственном отношении наиболее высокие скорости роста средних температур воздуха отмечались в Северной полярной области, где за последние 30 лет они составили около 2,64 °C. Повышение средних температур сопровождалось увеличением количества глобальных осадков над сушей со скоростью порядка 5–10 мм/год за десятилетие, которое происходило на фоне значительной межгодовой изменчивости и региональной неоднородности. На территории России темпы потепления климата составляют порядка 0,51 °C за десятилетие, что почти вдвое больше, чем в глобальном масштабе. В свою очередь в России одни из наиболее высоких темпов изменений климата отмечаются в Сибири. К 2050 г. при сохраняющихся тенденциях в сибирском регионе по пессимистичному сценарию можно ожидать повышения температуры не менее чем на 2,5 °C по сравнению с 1900 г., и это будет соответствовать дополнительному глобальному потеплению не менее чем на 0,5 °C [3].

Возросшие темпы изменений климата с начала 1970-х гг. происходят на фоне существенного роста роли Североатлантического колебания (NAO), с ко-

торым связано усиление зонального переноса над значительной частью территории России, вплоть до бассейна Енисея. С середины 1990-х гг. с активизацией арктических вторжений и увеличением повторяемости меридиональности типов атмосферных процессов резко возрастает влияние скандинавского антициклона (Scand) (в положительной фазе) [4]. Уникальность этого периода состоит в перемещении центра приполярной депрессии из района Гренландии и Исландии на восток, наиболее вероятной причиной которого может быть сокращение концентрации морского льда в Баренцевом и Карском морях [2]. Рост повторяемости арктических вторжений и холодных зим на севере Евразии в этот период, известный как пауза в потеплении, следует расценивать как следствие этого явления и, возможно, как его индикатор. Общему ослаблению зонального переноса внутриполярической зоны Северного полушария может способствовать перераспределение аномалий температуры поверхности Тихого океана, которому отводится роль фактора перерыва в потеплении [6].

Таким образом, наблюдаемые изменения климата на территории Северного полушария, включая территорию России, наряду с влиянием антропогенной составляющей тесно согласуются с вариациями крупномасштабных форм атмосферной циркуляции. Изменения интенсивности форм атмосферной циркуляции, в свою очередь, определяют количественные характеристики метеорологических величин, на которые накладывается влияние неоднородного рельефа, что указывает на актуальность и практическую значимость исследований циркуляционных факторов изменений климата.

Данные и методы исследования

В настоящее время для оценки циркуляционных факторов изменений климата в различных регионах России широко используется типизация макромасштабных атмосферных процессов, разработанная Б. Л. Дзерзееевским и продолженная Н. К. Кононовой, согласно которой элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ), действуя как единый, целостный механизм макроциркуляционного обмена, по-разному проявляется в тех или иных районах Северного полушария [1]. Данная типизация через траектории смещения подвижных барических образований (циклонов и антициклонов) отражает основные пути переноса тепла и влаги, что позволяет более детально анализировать причины региональных изменений климата. Все многообразие типов атмосферных процессов над внутриполярными широтами Северного полушария в ней объединены в четыре группы. В первую группу вошли зональные типы атмосферной циркуляции, во вторую группу процессы с одним арктическим вторжением, в третью группу с двумя и более арктическими вторжениями, а четвертая группа объединила процессы, при которых циклоническая деятельность охватывает Арктику. Средняя продолжительность рассмотренных типов циркуляционных процессов составляет от 3,6 до 5,3 сут.

Согласно типизации Дзерзееевского за период с 1899 г. по настоящее время на территории Северного полушария сменилось три циркуляционные эпохи: две меридиональные (с 1899 по 1915 г. и с 1957 г. по настоящее время) и

одна зональная (1916–1956 гг.). В настоящее время наблюдается меридиональная южная эпоха циркуляции, которая включает четыре временных периода: одновременного увеличения продолжительности меридиональных северных и южных процессов (1957–1969 гг.), повышенной продолжительности зональных процессов (1970–1980 гг.); быстрого роста продолжительности меридиональных южных процессов (1981–1998 гг.) и уменьшения продолжительности меридиональных южных процессов и роста меридиональных северных процессов (1999 – по наст. время).

В качестве района исследования выбрана Иркутская область, климатические условия которой определяются динамикой континентальных центров действия атмосферы (Азиатского антициклона и Центрально-Азиатской депрессии), а также активностью подвижных барических образований (циклонов и антициклонов). Для оценки динамики и возможного влияния крупномасштабных атмосферных процессов на изменение климата Иркутской области в работе рассматривалась многолетняя динамика основных групп атмосферных процессов за период 1899–2019 гг. на территории Сибирского сектора (60° в. д. – 119° в. д.) в масштабе от 30 до 90 °с. ш.

Результаты исследования

Зональный перенос является важной составляющей крупномасштабного переноса воздушных масс над умеренными широтами Северного полушария. Для территории Иркутской области зональный перенос имеет повышенную повторяемость в переходные сезоны года, когда осуществляется крупномасштабная перестройка циркуляционного режима при переходе на зимний или летний тип атмосферных процессов. В холодный период года при усилении зональных потоков на высотах сказывается отепляющее влияние океанов, а в теплый период года получают развитие процессы блокирования при смещении ядер антициклонов Азорского и Тихоокеанского максимумов вглубь материка. Анализ зональной составляющей в период 1899–2019 гг., слаженной по десятилетиям, указывает на то, что в период с 1899 по 1985 г. происходило постепенное увеличение продолжительности зональных форм циркуляции на территории Сибирского сектора, за незначительным спадом в холодные десятилетия второй половины XX в. (рис. 1). С 1985 г. по начало XXI в. зональная циркуляция чаще отмечалась на территории Сибирского сектора по сравнению с другими регионами Северного полушария. В период с 1985 по 2006 г. происходило уменьшение продолжительности зональных процессов в Сибирском секторе, которое началось значительно позднее по сравнению с Американским сектором (1971–1980 гг.) и другими регионами Северного полушария (середина 1970-х гг.). Положительный уровень корреляционной связи продолжительности зональных типов атмосферных процессов в Сибирском секторе прослеживается только с Американским сектором ($r = 0,55$), с остальными регионами статистическая связь обратная и наиболее статистически значимая с Европейским сектором ($r = -0,62$).

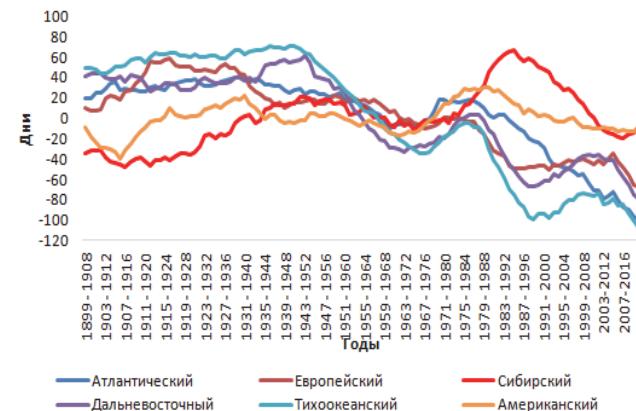


Рис. 1. Изменение продолжительности западной циркуляции (дни) на территории Северного полушария, осредненной по десятилетиям, за период 1988–2019 гг.

В период с 1899 г. на территории Сибирского сектора происходит существенное уменьшение продолжительности широтной западной группы атмосферных процессов в сочетании с долготной южной (рис. 2, в), долготной северной в сочетании со стационарным положением (рис. 2, д), широтной восточной (рис. 2, е), широтной западной (рис. 2, ж) и долготной южной (рис. 2, з) составляющими. Их уменьшение сопровождается значительным возрастанием, начиная с 1999 г., долготной северной (рис. 2, б) и широтной западной группы в сочетании со стационарным положением (рис. 2, г). Увеличение продолжительности меридиональной северной группы циркуляции происходит преимущественно за счет увеличения повторяемости типов синоптических процессов, которые на территории Северного полушария сопровождаются четырехволной системой с четырьмя блокирующими высотными гребнями и четырьмя траекториями выходов южных циклонов. Такие синоптические процессы на территории Восточной Сибири, включая регион исследования, Иркутскую область, наблюдаются при развитии блокирующих процессов над Забайкалем и сопряженной высотной ложбиной над Восточной Сибирью, под передней частью которой преимущественно арктические вторжения определяют адвективно-динамические факторы для образования южных циклонов над территорией Монголии. Другим типом процессов является формирование блокирующего гребня над Уралом и сопряженной Якутской тропосферной ложбиной, под тыловой частью которой на территории Иркутской области получают развитие адвективно-динамические факторы антициклогенеза. Увеличение продолжительности процессов блокирования также связано с широтной западной группы циркуляции в сочетании со стационарным положением, когда на западные и центральные районы Иркутской области преимущественно в теплое время года получают развитие гребни Азорского антициклона.

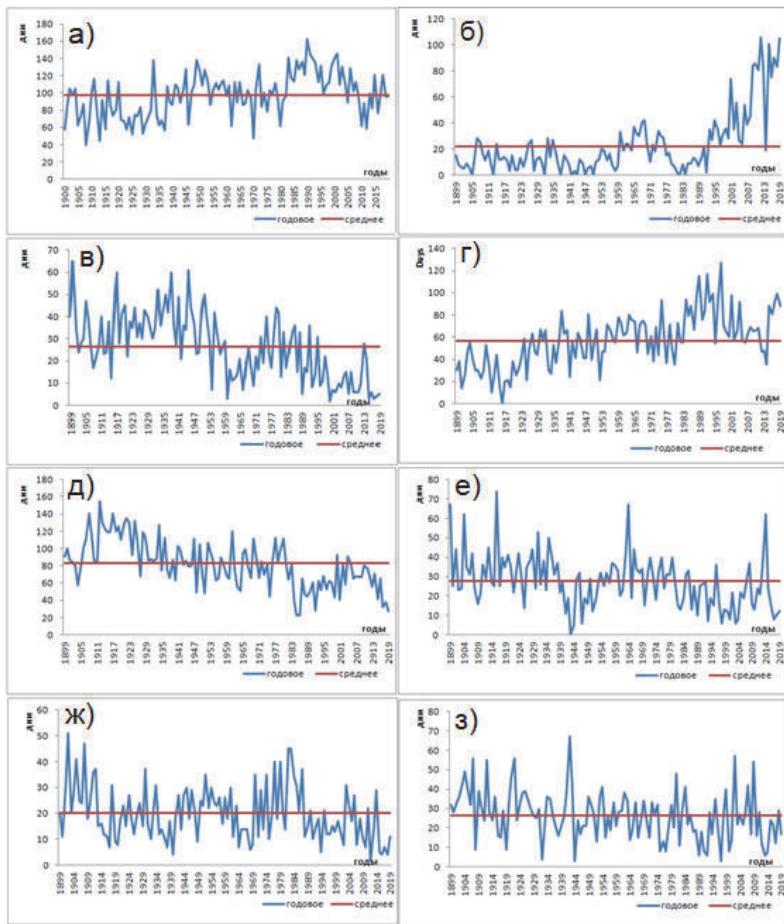


Рис. 2. Изменения годовой продолжительности (дни) форм атмосферной циркуляции по типизации Б. Л. Дзерзееевского: широтная западная (а), долготная северная (б), широтная западная в сочетании с долготной южной (в), широтная западная в сочетании со стационарным положением (г), долготная северная в сочетании со стационарным положением (д), долготная северная в сочетании с широтной восточной (е), широтная западная в сочетании с долготной западной (ж), долготная северная и в сочетании с долготной южной (з) в Сибирском секторе за 1899–2019 гг.

Наибольший интерес для исследования представляет резко возросшая продолжительность долготной северной группы атмосферных процессов. Необходимо отметить, что в среднем за год на территории Иркутской области в 2010–2019 гг. продолжительность меридиональной северной группы процессов составляет 22 дня с наибольшими значениями (4) в апреле и в мае, а наименьшими

(1) зимой в период господствующего влияния Азиатского антициклона. Необходимо отметить, что увеличение продолжительности меридиональной северной группы процессов на территории Сибирского сектора происходит во все месяцы года с наибольшей скоростью в апреле, октябре и декабре (рис. 3).

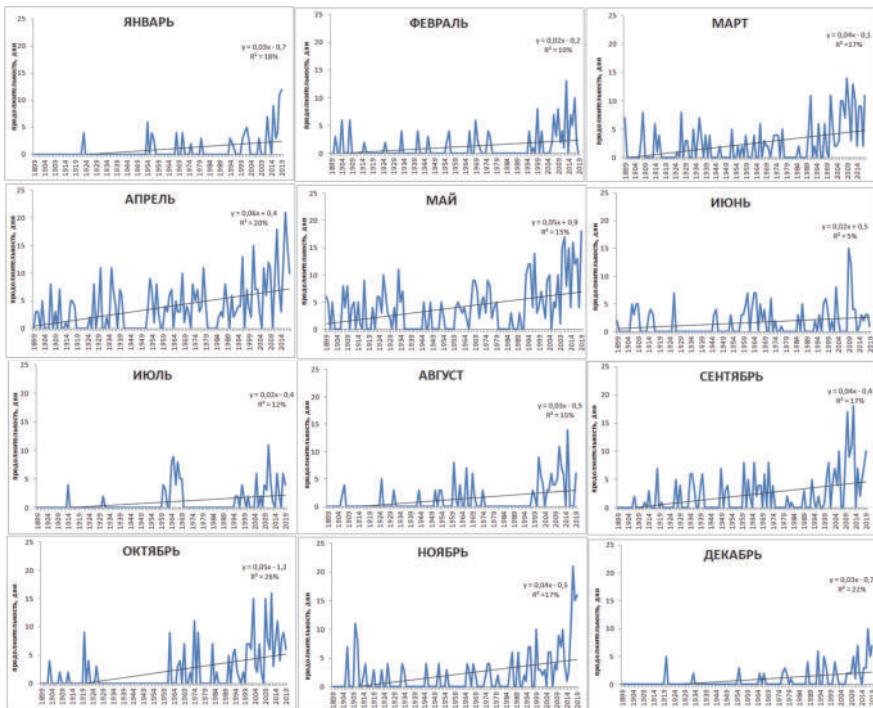


Рис. 3. Изменения продолжительности (дни) долготной северной группы атмосферной циркуляции по типизации Б. Л. Дзердзевского в Сибирском секторе за 1899–2019 гг.

Для исследования возможного вклада циркуляционных факторов в изменения климата на территории Иркутской области было проанализировано число месяцев за год с положительными аномалиями средних месячных температур воздуха на метеорологических станциях Иркутск (52° с. ш., 104° в. д.) и Ербогачен (61° с. ш., 108° в. д.), расположенных соответственно на юге и севере Иркутской области. Увеличение продолжительности долготной северной группы атмосферных процессов в начале XXI в. на территории Иркутской области сопровождается ростом числа месяцев в году с положительными температурными аномалиями (рис. 4). Если в период господства зональных процессов во второй половине XX в. в среднем за год 6 месяцев имели положительные температурные аномалии, то в настоящий период по югу области их число в среднем составляет 9 месяцев, по северу 7 месяцев в году. Необходимо отметить, что в последние

годы происходит более тесное согласование временной динамики температурных аномалий между северными и южными районами Иркутской области. Во внутригодовой динамике аномалий средних месячных температур воздуха в период возрастания продолжительности меридиональных северных процессов на территории Иркутской области за два последних десятилетия устойчивый рост температур отмечается по данным ст. Иркутск в марте, апреле, в летние месяцы и в декабре. В январе, феврале, мае и в ноябре отмечается тенденция уменьшения числа положительных температурных аномалий. В Ербогачене по сравнению со ст. Иркутск более выражена тенденция потепления климата. В последнее десятилетие она проявляется во все месяцы года, за исключением мая, июля, ноября и декабря.

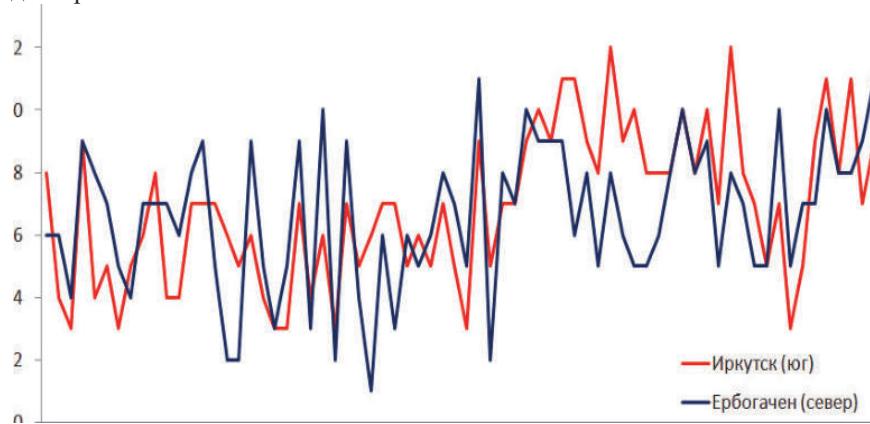


Рис. 4. Изменение числа месяцев за год с положительными аномалиями средних месячных температур воздуха на станциях Иркутск и Ербогачен в 1950–2021 гг.

Заключение

Территория Иркутской области – регион, где современные тенденции изменения температурного режима тесно коррелируют с многолетней динамикой меридиональных типов атмосферных процессов. Современный циркуляционный период на территории Сибирского сектора и Иркутской области можно назвать периодом меридиональной северной и меридиональной южной группы процессов в сочетании с западной широтной группой со стационарным положением. Резкое увеличение продолжительности долготной северной группы атмосферных процессов сопровождается увеличением числа месяцев за год с положительными аномалиями средних температур, как по северу, так и по югу Иркутской области. В южных районах Иркутской области наиболее высокие темпы роста средних температур отмечаются в начале и середине весны, летом и в начале зимы, на севере области в начале и в середине весны, в начале и в конце лета, в начале и в середине осени, в середине и в конце зимы.

Повышение температуры можно объяснить увеличением продолжительности процессов блокирования над Иркутской областью и усилением повторяемости ветров южной и юго-западной составляющей с сопряженными арктическими вторжениями над Западной Сибирью и Дальним Востоком, а также возросшим вкладом широтной западной группы в сочетании со стационарным положением. Указанные процессы в летние месяцы на фоне роста средних температур сопровождаются увеличением засушливости климата и связанных с ними лесных пожаров, а в холодное время года увеличением перепадов среднесуточных температур, увеличением высоты снежного покрова, усилением ветра, т. е. более резкими изменениями погодных условий в регионе исследования.

Список литературы

1. Дзердзеевский Б. Л., Монин А. С. Типовые схемы общей циркуляции атмосферы в Северном полушарии и индекс циркуляции // Известия АН СССР. Сер. Геофизика. 1954. № 6. С. 562–574.
2. Изменения распространения морских льдов в Арктике и связанные с ними климатические эффекты: диагностика и моделирование / И. И. Мохов [и др.] // Лед и Снег. 2012. № 2(122). С. 53–62.
3. Ложкина О. В., Савинов А. Г., Орловцев С. В. Глобальное потепление и природные пожары: анализ мировых тенденций // Пожарная безопасность: современные вызовы. Проблемы и пути решения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. СПб., 2022. С. 195–198.
4. Полопова В. В., Ширяева А. В., Морозова П. А. Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // Криосфера Земли. 2018. № 4. С. 65–75.
5. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб. : Наукомиссия технологии, 2022. 124 с.
6. Trenberth K. E., Fasullo J. T. An apparent hiatus in global warming? // Earth's Future. 2013. N 1. P. 19–32. <https://doi.org/10.1002/2013EF00016>

УДК 551.553

Современные тенденции ветрового режима на территории Беларуси в условиях трансформации климата

И. С. Данилович (irina-danilovich@yandex.ru)^{1,2}, И. В. Костюченко (archi0501@rambler.ru)^{2,3}

¹Институт природопользования НАН Беларуси, Минск

²Белорусский государственный университет, Минск

³Белгидромет Минприроды, Минск

Аннотация. Представлены оценки изменения среднегодовой и максимальной скорости ветра, а также повторяемости направлений ветра на территории Беларуси в период изменения климата (1989–2020 гг.) по 42 метеорологическим станциям Белгидромета Минприроды. Показано, что среднегодовая скорость ветра продолжает снижаться с 1970-х гг., снижение составляет 0,9–1,0 м/с. Уменьшение сезонных значений средней скорости ветра составляет 0,6–1,2 м/с, максимальной – 2,5–3,5 м/с. Снижение средней скорости ветра наиболее интенсивно происходит на севере Беларуси. На фоне общего понижения скорости ветра максимальный порыв ветра снизился в зимний период на 1–5 м/с, но увеличился летом на 1–3 м/с. Зимой отмечается снижение повторяемости восточных и увеличение западных направлений ветра вдвое, летом – снижение южных и увеличение северных румбов ветра на треть.

Ключевые слова: скорость ветра, максимальный порыв ветра, направление ветра, изменение климата, ветровой режим, тренд.

Введение. Современное изменение климата в той или иной степени оказывает влияние на все сферы экономической деятельности человека. Наиболее детально в контексте трансформации климата изучено изменение температуры воздуха, режима увлажнения и повторяемости неблагоприятных атмосферных явлений. Региональные оценки ветрового режима реже встречаются в современных климатических исследованиях. Результаты некоторых из них [7] показывают, что в 2021 г. в Северо-Западной и Центральной Европе наблюдались одни из самых низких среднегодовых скоростей ветра за период 1979–2020 гг., среднегодовая скорость ветра в 2021 г. была ниже средней до 10 %, но на юго-востоке Европы, преобладали ветры сильнее средних значений. Причины подобных аномалий связаны с блокирующими антициклонами над северо-восточной Атлантикой и Гренландией.

В дни с блокирующими процессами в атмосфере происходит более низкая выработка возобновляемой ветровой энергии [11]. Система аномального высокого давления над Скандинавией снижает нормальный зональный перенос, скорость ветра на высоте 10 м над Северным и Кельтским морями и Бискайским заливом отмечается ниже нормы, а приходящая солнечная радиация выше нормы. Снижение скорости ветра ограничивает потенциал ветроэнергетики в большом регионе от западной Атлантики до Балтийского моря. Над Северным морем, Великобританией и Ла-Маншем потенциал ветровой энергии при таких условиях ниже чем на 20 %.

В будущем распределение ветровых ресурсов существенно изменится [9]. Например, согласно расчетам в работе [13] ожидается усиление скорости ветра в бассейне Балтийского моря на 5–10 %. Масштабы изменений скорости ветра максимальны при сценарии наибольших выбросов парниковых газов. При этом направление изменений различно, но сокращение ветровых ресурсов вероятно для большинства регионов северного полушария.

Некоторые авторы в своих работах [8] отмечают тенденцию к уменьшению скорости приземного ветра во многих регионах северного полушария, в том числе и на территории Беларуси [10]. Кроме того, снижение скорости ветра отмечается в соседних с Беларусью странах: ЕТР России [5], Латвии [14], Украине [1], но при этом отмечается увеличение повторяемости шквалов и смерчей в Польше [12] и Украине [1].

Территория Республики Беларусь расположена в умеренных широтах северного полушария. Основным климатообразующим фактором в регионе является влияние Атлантического океана, которое ослабевает при движении на восток. Беларусь располагает значительными ресурсами энергии ветра. Среднегодовая фоновая скорость ветра на территории страны за период (1948–2009 гг.) составляет 4,3 м/с. Согласно данным [4] в целом по стране наибольшую продолжительность в часах за год (3500–4100 ч/год) имеет ветер со скоростью 4–8 м/с. В начале 70-х гг. XX столетия произошло существенное уменьшение скорости ветра. Авторами была предпринята попытка связать снижение средней скорости ветра с потеплением климата, однако им не удалось обнаружить прямую связь, поскольку снижение средней скорости началось раньше, примерно с 70-х гг. XX

столетия, а потепление климата берет свое начало с конца 80-х гг. прошлого столетия. Отдельным пикам потепления соответствуют периоды наибольшего ослабления ветра (например, в начале 80-х, конце 90-х и начале 2000-х гг.), однако отмечаются периоды с противоположной ситуацией: начало 70-х, конец 80-х гг.

Согласно выводам в работе [3], причиной уменьшения скорости ветра является рост интенсивности Северо-Атлантического колебания и увеличение повторяемости глубоких барических образований, проходящих через территорию всей Европы, в том числе Беларуси.

В связи с продолжающимся процессом потепления климата и устойчивым снижением скорости ветра на территории Беларуси, цель работы заключалась в оценке величины изменения средних и экстремальных показателей скорости ветра и повторяемостей его направления в период трансформации климата (1989–2020 гг.).

Методика и исходные данные

Оценка современных изменений ветрового режима на территории Беларуси выполнена на основе результатов инструментальных измерений скорости ветра на высоте 10 м и направлений ветра на сети гидрометеорологических наблюдений ГУ «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Данные наблюдений представлены среднемесячными, сезонными и годовыми значениями скорости ветра и их повторяемостями по 42 метеорологическим станциям, расположенным на территории Беларуси.

Оценка ветрового режима включала расчеты средних значений годовой, сезонной и месячной скорости ветра; максимальной за год, сезоны и месяцы скорости ветра, а также максимальных порывов ветра за различные периоды и их тренды; расчеты повторяемости направлений ветра в январе и июле.

Результаты

Изменения среднегодовой скорости ветра. Как показано в работах [4; 6], скорость ветра на территории Беларуси снижается с 1970-х гг., снижение составляет 0,9–1,0 м/с. Рисунок 1 представляет динамику среднегодовой скорости ветра по 10 метеорологическим станциям Беларуси. Среднегодовая скорость ветра в период 1948–1988 гг. колебалась в пределах 3,3–3,6 м/с, в период потепления климата, который на территории страны отмечается с 1989 г., среднегодовая скорость ветра составляет от 2,5 до 2,8 м/с. Отрицательные тренды среднегодовой скорости ветра составляет 0,04–0,40 м/с за десятилетие или 0,3–2,8 м/с за 72-летний период (1948–2020 гг.).

Уменьшение средней скорости ветра наиболее интенсивно происходит на севере Беларуси. В период с 1948 по 1988 г. на севере страны наибольшие значения средней скорости ветра наблюдались в ноябре, декабре и январе и составляли 4,1, 4,0 и 4,0 м/с соответственно. За исследуемый период с 1989 по 2020 г. средняя скорость ветра остается наибольшей в эти же месяцы, но составляет 2,9, 3,0 и 3,1 м/с. То есть снижение средней скорости ветра составило 1,2 м/с в ноябре, 1,0 м/с в декабре и 0,9 м/с в январе.

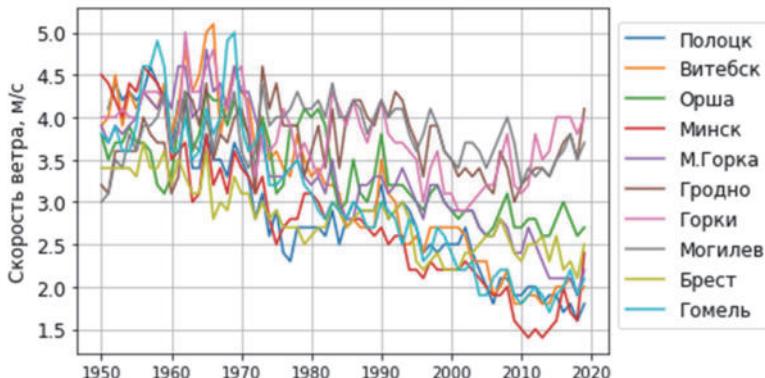


Рис. 1. Изменение среднегодовой скорости ветра на территории Беларуси

Наименьшие значения средней скорости ветра приходятся на летние месяцы (июль и август) в течение периода 1948–2020 гг. В базовый период (1948–1988 гг.) эти значения составили 2,7–2,8 м/с, а в период заметного изменения климата – 2,1 м/с. Наименьшие значения средней скорости ветра уменьшились на 0,6–0,7 м/с.

В остальные месяцы года также наблюдается снижение средних скоростей ветра в пределах 0,7–1,0 м/с. Кроме того, амплитуда (разность между наибольшими и наименьшими месячными значениями) средних скоростей ветра уменьшилась на 0,5 м/с и составляет 0,9 м/с.

На станциях Беларуси, расположенных в центральном и южном районах наибольшие значения средней скорости ветра наблюдаются в зимние месяцы: 3,3 м/с в январе в центральном регионе и 2,9 м/с для южного региона. По сравнению с периодом предшествующем потеплению климата, уменьшение составило 0,8–0,9 м/с. Наименьшее значение средней скорости ветра наблюдается в летние месяцы (август): в центральном регионе – 2,2 м/с, в южном – 2,0 м/с. Уменьшение составило 0,7 и 0,6 м/с соответственно. В течение остальных месяцев года уменьшение средней скорости ветра составило 0,6–1,1 м/с. Уменьшение амплитуды средней скорости ветра в центральном регионе 0,1 м/с, а в южном регионе 0,3 м/с.

Изменения максимальной скорости ветра. Изменения максимальной скорости ветра характеризуется аналогичными тенденциями. Наибольшие значения максимальной скорости ветра наблюдаются в центральном регионе Беларуси. В период 1948–1988 гг. наблюдались 2 пика максимальных скоростей ветра – в декабре и в марте и составляли 12 м/с. В период изменения климата (1989–2020 гг.) пики максимальной скорости ветра сохраняются, но их значения ниже – 8,5 и 9,1 м/с соответственно. Однако к ним добавилось пиковое значение в 9,2 м/с в январе. Таким образом, снижение наибольших значений максимальной скорости ветра в исследуемый период составило 3,5; 2,9 и 2,7 м/с.

Наименьшие значения максимальных скоростей ветра характерны в летний период. При этом самое низкое значение максимальной скорости ветра характерно для северного региона страны и составляет в июле 6,4 м/с.

Средние показатели максимальной скорости ветра за год уменьшились в северном регионе на 3,3 м/с и составили 7,4 м/с; в центральном регионе уменьшилось на 2,8 м/с и составили 8,2 м/с; а в южном – на 3,3 м/с и составили 7,5 м/с.

Изменения максимальных порывов ветра. Несмотря на общее снижение средней и максимальной скорости ветра максимальные порывы ветра характеризуются разнонаправленными тенденциями в течение года. Тренды максимальных порывов ветра в течение летних месяцев на большинстве станций Беларуси положительны, а в зимние месяцы – отрицательны.

На рис. 2 представлено распределение величин трендов максимальных порывов ветра в зимние и летние месяцы. Наибольшие величины трендов максимальных порывов ветра характерны для ряда станций, расположенных на северо-западе и западе страны, не зависимо от сезона года. Вероятно, на ветровой режим в районе этих станций оказывают существенное влияние местные особенности рельефа. Например, расположенные метеостанции в пределах Новогрудской возвышенности (наиболее высоком участке) часто показывают значения порыва ветра выше остальных по стране.

Максимальный порыв ветра за год уменьшился на 1,2 м/с в центральной и южной частях страны и не изменился на севере Беларуси, снижение максимального порыва ветра составляет 0,1–0,2 м/с за десятилетие или 0,7–1,4 м/с за 1948–2020 гг.

Зимой уменьшение величин максимального порыва составляет 1–5 м/с и характерно для всей территории страны. Летом отмечается преимущественно увеличение максимальных порывов ветра на 1–3 м/с.

Изменение повторяемостей направлений. В январе на большей территории страны вдвое уменьшилась повторяемость восточных румбов и увеличилась повторяемость западных направлений ветра. В северной и западной частях страны увеличилась повторяемость штилей на 30 %. В июле отмечается уменьшение на треть южных и юго-восточных направлений ветра и возросла повторяемость румбов северной четверти. Летом также увеличилась повторяемость штилей, но не так значительно, как в январе – на 5–10 %.

Прогнозные оценки согласно расчетам, представленным в работе [2] показывают, что изменения среднегодовой и среднесезонной скорости ветра на территории Беларуси ожидаются в незначительных пределах в текущем столетии. В целом большинство климатических моделей показало увеличение количества дней с сильным ветром зимой на 2–2,5 дня, в то время как летом количество дней с сильным ветром предположительно уменьшится на 3 дня.

Заключение

Проведенное исследование показало продолжающуюся тенденцию снижения скорости ветра на территории Беларуси. В период потепления климата (1989–2020 гг.) среднегодовая скорость ветра составляет 2,5–2,8 м/с. Величина отрицательных трендов среднегодовой скорости ветра составляет 0,04–0,40 м/с за десятилетие и 0,3–2,8 м/с за период 1948–2020 гг.

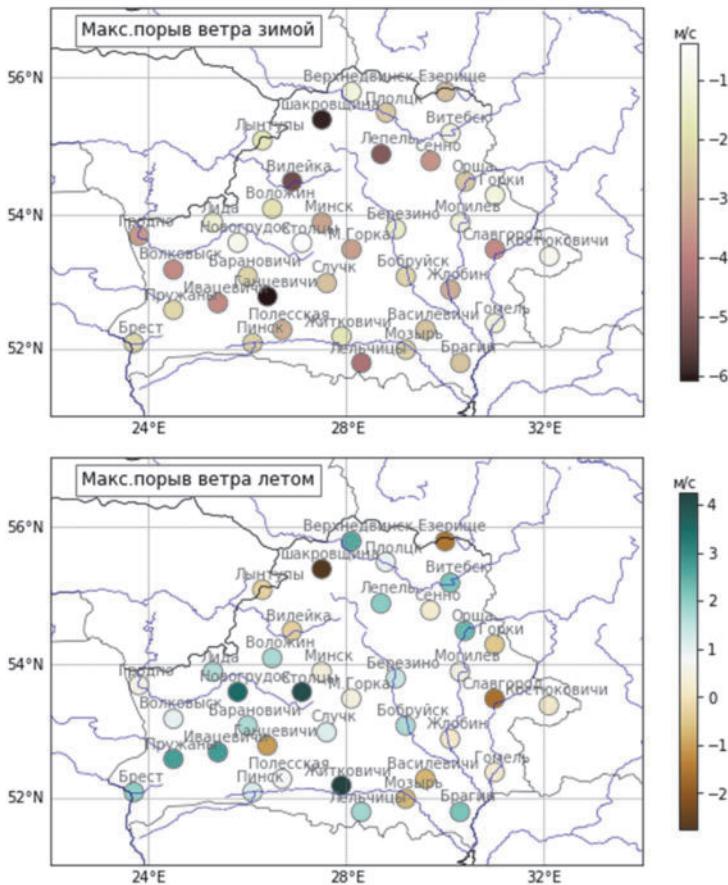


Рис. 2. Распределение величин трендов максимальных порывов ветра зимой (XII–II) и летом (VI–VIII) за период 1989–2020 гг.

Установлено, что снижение скорости ветра наблюдается на протяжении всех месяцев года. Уменьшение средней скорости ветра наиболее интенсивно происходит на севере страны и составляет 0,9–1,2 м/с в зимний период и 0,6–0,7 м/с в летний период. Распределение скоростей в течение года становится более равномерным, произошло уменьшение амплитуды средних скоростей ветра на 0,5 м/с. Для центрального и южного регионов Беларуси снижение средней скорости ветра составило 0,8–0,9 м/с в зимний период и 0,7–0,6 м/с летом, что привело к снижению амплитуды на 0,1 м/с и 0,3 м/с соответственно.

Наряду с этим происходят аналогичные изменения максимальной скорости ветра. Наибольшие значения максимальной скорости ветра характерны для зимнего периода, а наименьшие – для летнего периода. Средние показатели макси-

мальной скорости ветра за год уменьшились в северном регионе на 3,3 м/с и составили 7,4 м/с; в центральном регионе уменьшилось на 2,8 м/с и составили 8,2 м/с; а в южном – на 3,3 м/с и составили 7,5 м/с.

В отличие от средней и максимальной скорости ветра, максимальные порывы ветра имеют разнонаправленные тенденции. Максимальный порыв ветра за год уменьшился на 1,2 м/с в центральном и южном регионах страны и не изменился на севере Беларуси. Снижение максимального порыва ветра составляет 0,1–0,2 м/с за десятилетие или 0,7–1,4 м/с за 1948–2020 гг. В летний период на большинстве станций Беларуси тренды максимальных порывов ветра положительны и составляют 1–3 м/с за период потепления климата, в зимний – отрицательные тренды составляют 1–5 м/с.

В период изменения климата наблюдается изменение повторяемостей направлений ветра. Зимой увеличилась повторяемость западных направлений, а в летний период – северных. Повторяемость штилей возросла зимой на 30 %, а летом – на 5–10 %.

Список литературы

1. Проекция изменения и ожидаемые значения климатических средних и показателей экстремальности термического режима к середине XXI века в Украине / В. А. Балабух, Л. В. Малицкая, С. Н. Ягодинец, Е. Н. Лавриненко // Природопользование. 2018. № 1. С. 97–113.
2. Данилович И. С.; Логинов В. Ф. Текущие и ожидаемые изменения климата на территории Беларусь // Центральноазиатский журнал географических исследований. 2021. № 1–2. С. 35–48.
3. Логинов В. Ф. Глобальные и региональные изменения климата: причины и следствия. Минск : ТетраСистемс, 2008. 496 с.
4. Логинов В. Ф., Лысенко С. А., Мельник В. И. Изменение климата Беларусь: причины, последствия, возможности регулирования. 2-е изд. Минск : Энциклопедикс, 2020. 264 с.
5. Росгидромет. Второй оценочный отчет Росгидромета об изменении климата и его последствиях в Российской Федерации. М., 2014.
6. Трифонова А. Г., Михалычева Э. А., Камлюк Г. Г. «Оценка ветроэнергетических ресурсов и разработка рекомендаций по выбору мест размещения ветроэнергетических установок на территории Республики Беларусь» / Доклад на семинаре экспертов по возобновляемым источникам энергии. 2011. URL: https://energobelarus.by/articles/alternativnaya_energetika/otsenka_vetroenergeticheskikh_resursov_i_razrabotka_rekomendatsii_po_vyboru_mest_razmeshcheniya_vetroenergeticheskikh ustavok_na_territorii_respubliki_belarus/ (дата обращения: 05.09.2022).
7. Состояние климата в Европе: климатический бюллетень программы Copernicus, 2021. URL: <https://climate.copernicus.eu/esote/2021/flow-winds> (дата обращения: 09.10.2022).
8. Martines A., Iglesias G. «Wind resources evolution in Europe under different scenarios of climate change characterized by the novel Shared Socioeconomic Pathways». URL: <https://www.sciedirect.com/science/article/pii/S0196890421001370> (date of access: 29.09.2022).
9. Christopher Jung, DirkSchindler «A review of recent studies on wind resource projections under climate change» // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 165. P. 112596.
10. Danilovich I., Beate Geyer. Estimates of current and future climate change in Belarus, based on meteorological stations data and the EURO-CORDEX-11 dataset // Meteorology, Hydrology and Water Management. 2021. N 1-2. <https://doi.org/10.26491/mhwn/139386>
11. The impact of observed regimes on production and demand for high energy in Europe / K.van der Wiel, H. S. Bloomfield, R. W. Lee, L. P. Stoop, R. Blackport, J. E. Skrin, F. M. Selten // Environmental Letters. 2019. Vol. 14, N 9.
12. Kożuchowski K. Klimat Polski. Nowe spojrzenie. Warszawa : Wydawnictwo Naukowe PWN, 2011. 296 p.
13. Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations / G. Nikulin, E. Kjellström, U. Hansson, G. Strandberg, A. Ullerstig // Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography. 2011. Vol. 63 (1). P. 41–55. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00466.x>
14. Summary Report: Climate change scenarios for Latvia, Project «Development of Proposal for National Adaptation Strategy, Including Identification of Scientific Data, Measures for Adapting to Changing Climate, Impact and Cost Evaluation». Riga, 2017. 17 p.

УДК 551.509.52

Восстановление синоптического положения для прогнозов погоды

Е. М. Киселева (lizakiseleva01@mail.ru), О. В. Волобуева (ovvolobueva@rshu.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Статья посвящена исследованию способа восстановления синоптической обстановки в период недостатка данных. Рассмотрен синоптический метод восстановления барического поля на так называемых обрезанных картах погоды, который включает в себя этапы восстановления синоптической обстановки при помощи: высотных и приземных карт и данных зондирования. После восстановления произведено уточнение восстановленной синоптической обстановки с учетом климатических особенностей исследуемого района, а также с использованием спутниковой информации. На заключительном этапе восстановленное поле изучено на предмет качества восстановления высотных и приземных карт барической топографии для дальнейшего составления прогнозов погоды.

Ключевые слова: синоптическая обстановка, карты погоды, методы восстановления, прогноз погоды.

Введение

Основной задачей метеорологической службы является обеспечение авиационных пользователей: органов ОВД, экипажей воздушных судов всеми видами метеорологической информации, необходимой для планирования, организации, выполнения полетов и руководства ими. Особое значение принимает эта задача в условиях, когда метеорологические данные недостаточно полные или вовсе отсутствуют на какой-либо значимой для понимания синоптических процессов территории.

Отсутствие постоянной сети гидрометеорологических станций и регулярной информации о погоде с отдельных территорий, принуждает специалистов метеорологической службы к работе по, так называемым, «обрезанным картам». Недостаток метеорологической информации в значительной степени затрудняет ее обработку и понижает оперативность составления прогнозов погоды [2].

Разработка краткосрочных прогнозов погоды в таких условиях имеет определенные особенности, при этом формулировка прогноза должна оставаться четкой, лаконичной и не допускать двойного толкования. При составлении прогнозов неизменной остается терминология и градации значений метеорологических элементов и параметров атмосферы, но при отсутствии или ограниченном количестве данных градации могут быть увеличены: по высоте облаков – на 100 м (при ВНГО ≤ 300 м) или на 200 м (ВНГО > 300 м); по видимости – на 500 м (при видимости до 2000 м) и на 1000 м (при видимости более 2000 м); по ветру на 3 м/с (при ветре до 15 м/с) и на 5 м/с (при скорости ветра, превышающей 15 м/с); по температуре на 2 °C у земли и на 5 °C на высотах.

В настоящее время известны три группы методов восстановления метеорологических полей: численные, синоптические и с использованием спутниковой информации [2].

Восстановление численными и синоптическими методами осуществляется путем интерполяции полей метеорологических элементов из района исходного положения, где метеорологической информации достаточно для определения синоптического положения и погодных условий с требуемой детализацией на районе восстановления.

Численные методы основаны на решении уравнений гидродинамики и термодинамики. Данный метод обладает преимуществом, например, объективностью анализа синоптической обстановки, при этом в настоящее время он, в отличие от возможностей прошлых десятилетий, благодаря развитию технологий, средств и методов сбора информации, ее обработки, стал незаменимым инструментом в оперативной работе прогнозистов.

Синоптический метод основан на анализе карт погоды, использовании физико-статистических связей и расчетов. К их достоинствам относятся сравнительная простота и оперативность.

Способы восстановления с использованием спутниковой информации основаны на взаимосвязи полей облачности с барическим полем и некоторыми другими характеристиками состояния атмосферы. Их отличает большая по сравнению с синоптическим методом объективность.

Продукты численных моделей постоянно совершенствуются и широко используются прогнозистами. Поэтому в данной работе будут рассмотрены последние два метода, а также основные правила и приемы, которые рекомендуются при восстановлении синоптической обстановки для составления прогнозов погоды с помощью спутниковой информации и синоптического метода [2].

Методика восстановления и оценки метеорологической обстановки при недостатке информации

В практической работе при восстановлении синоптической обстановки над территорией с редкой сетью метеорологических станций зачастую применяется синоптический метод, который основан на общих закономерностях развития атмосферных процессов. Рассматриваемый метод имеет ряд правил и рекомендаций для восстановления барического поля и положения атмосферных фронтов, который включает в себя: определение положение осей ложбин, гребней и центров барических образований; определение конфигурации изогипс; восстановление геопотенциала; восстановление положения осей гребня и ложбины, восстановление барических образований и восстановление положения циклонов и антициклонов на карте АТ-500; этап уточнения восстановленной синоптической обстановки при помощи карт нефонализа и другие методы уточнения синоптической обстановки.

Рассмотрим первые этапы восстановления: определение положение осей ложбин, гребней и центров барических образований и определение конфигураций изогипс (рис. 1).

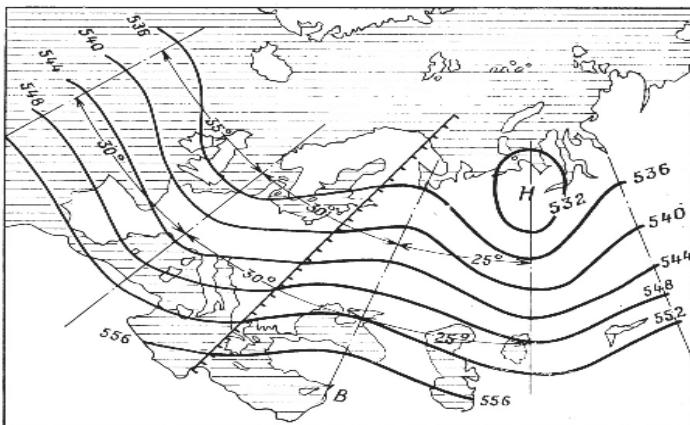


Рис. 1. Пример обрезанной карты, восстановление осей ложбины

Определение барического поля за границей восстановления начинают с определения поля абсолютного геопотенциала АТ-500, так как перестройка барического поля происходит медленнее приземного, крупномасштабные барические гребни и ложбины существуют дольше и смешаются с меньшей скоростью, а геометрическая структура поля геопотенциала на этих уровнях менее сложна по сравнению с барическим полем у поверхности земли. Мелкие образования в средней тропосфере, как правило, отсутствуют, и поле геопотенциала представляет собой чередующиеся ложбины и гребни значительных размеров.

Восстановление поля геопотенциала начинается с нахождения оси ложбин и гребня, ближайших к границе восстановления, а на широтах 65°, 55°, 45° – измеряют в градусах долготы расстояния между ними; далее измеренное расстояние откладывают от ближайшей границы восстановления оси ложбины или гребня вдоль широты в сторону восстановления; полученные точки соединяют линией, которая является осью восстановленного гребня или ложбины. Затем определяют положение следующих осей. Далее происходит восстановление положения осей гребня и ложбины. Расстояния между осями в районе исходного положения близки к их средним значениям. При проведении изогипс используется правило, характерное для поля геопотенциала: свойство симметричности изогипс по отношению к осям ложбин и гребней [4].

Для проведения изогипс необходимо: в районе исходного положения привести ось ближайшей к границе восстановления ложбины (гребня), которая принимается за ось симметрии (рис. 2); каждую изогипсу, переходящую в район восстановления, продолжить таким образом, чтобы она была симметрична участку, расположенному по другую сторону оси симметрии (на рис. 2 участок $a'b'$ симметричен участку ab). Изогипсы проводятся таким образом, чтобы скорость градиентного ветра не превышала 100–120 км/ч.

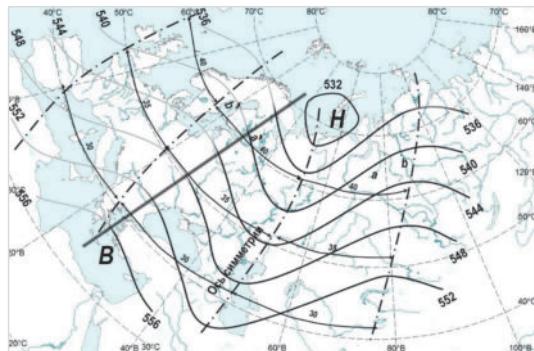


Рис. 2. Этап восстановления – проведение изогипс на карте

Если измеренные расстояния между осями ложбины и гребня отличаются от средних более чем на 5 градусов долготы, то при восстановлении исходят из предположения, что с переходом на район восстановления расстояния между осями смежных ложбин и гребней постепенно приближаются к их средним значениям. В этом случае положение осей определяется с помощью последовательного изменения измеренного расстояния на 5 градусов до приведения его к «нормальному» виду. После проведения осей приступают к определению изогипс. Этот метод часто называют методом зеркального отображения [4].

После восстановления положения осей гребня и ложбины следует восстановление положения барических образований на карте АТ-500 (рис. 3, а, б).

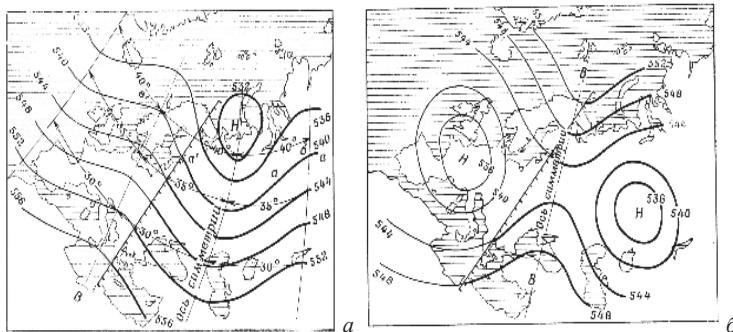


Рис. 3. Этап восстановления положения барических образований на карте АТ-500

Поле абсолютного геопотенциала в средней тропосфере часто бывает представлено хорошо выраженным циклонами и антициклонами и нередко имеет вид высотного деформационного поля, состоящего из двух областей высокого и двух областей низкого давления. Поэтому, при наличии в районе исход-

нного положения трех элементов деформационного поля, недостающее барического образование восстанавливают как элемент, симметричный по размерам и интенсивности барическому образованию того же знака.

Когда в районе исходного положения имеются только два элемента деформационного поля, недостающие барические образования восстанавливаются также в соответствии с принципом симметрии деформационного поля, но уже относительно гиперболической точки Г. Эти два метода могут использоваться и для восстановления барического поля у поверхности земли.

Восстановление приземного барического поля следует начинать с анализа синоптических процессов в районе исходного положения. Анализ проводится по синоптическим картам за несколько последовательных сроков. Особое внимание при этом обращают на положение центров циклонов и антициклонов, атмосферных фронтов, их активность, эволюцию, скорость и направление перемещения. Затем производится восстановление приземных циклонов и антициклонов, как недостающих элементов деформационного поля методом зеркального отображения (рис. 4).

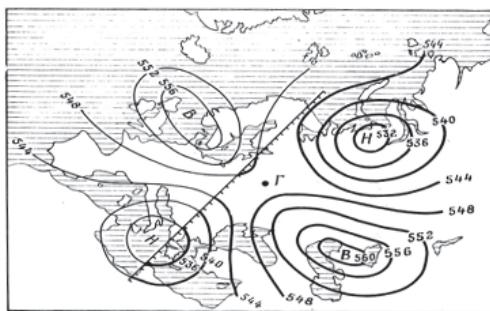


Рис. 4. Пример метода зеркального отображения циклонов-антициклонов

Улучшить качество синоптического метода восстановления метеорологических полей можно, используя в работе данные воздушной и радиолокационной разведок погоды; местные признаки погоды; аэросиноптические консультации центральных прогностических органов; данные радиозондирования. Кроме того, при прогнозе могут использоваться данные, получаемые с метеорологических искусственных спутников Земли.

По данным искусственных спутников Земли можно судить о местоположении центров барических образований, их конфигурации, наличии фронтов за границей восстановления.

Существует несколько признаков, говорящих о наличии фронтов: во-первых, обширные до сотен километров, поля плотной слоистообразной облачности; во-вторых, вытянутые в виде цепочки вершины кучево-дождевых облаков [1].

Основными дешифровочными признаками на спутниковых снимках являются тон (яркость) изображения, структура поля облачности (рис. 5). Облачность имеет более светлый тон, чем подстилающая поверхность. Темные участки, как

правило, соответствуют участкам тумана, низкой облачности под инверсией и безоблачной погоде. Светлые участки характерны для материкового льда и плотной облачности большой мощности, серые участки соответствуют тонким облачкам слоистых форм и кучевым облакам с просветами.

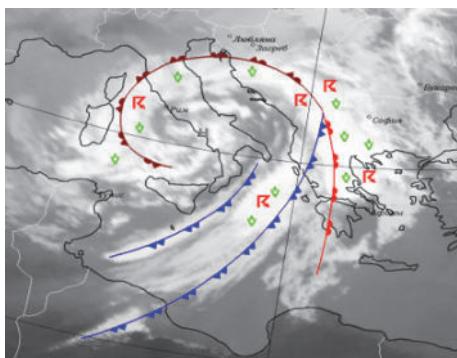


Рис. 5. Пример спутникового снимка для выявления положения атмосферных фронтов

Когда имеются данные нескольких последовательных снимков одной и той же территории, можно определить направление и скорость перемещения фронтальных разделов. Для этого на карту наносятся границы облачных зон, зафиксированные на каждом спутниковом снимке. Направление и скорость перемещения этих границ могут быть приняты за направление и скорость перемещения фронта.

Методы уточнения синоптической обстановки

Использование данных отдельных метеорологических и аэрологических станций является важнейшим средством уточнения синоптической обстановки и условий погоды над районом восстановления.

Уточнение высотного барического поля производится на основе данных о скорости и направлении ветра. Для этой цели по имеющимся аэрологическим данным за границей восстановления выбираются сведения о ветре на высоте изобарической поверхности 500 гПа или любой другой поверхности. При этом допускается использование ветра на высотах, которые отличаются от средней высоты рассматриваемой изобарической поверхности не более чем на 1 км в ту или иную сторону. Все имеющиеся данные о ветре наносятся на восстановленную карту АТ-500. Затем производится исправление восстановленного поля геопотенциала в соответствии с фактическим ветром. При этом вначале согласовывается направление изогипс с направлением ветра, а потом густота изогипс с его скоростью.

Для уточнения барического поля у поверхности земли на восстановленную приземную карту наносятся данные, полученные с отдельных станций в районе

восстановления. Барическое поле уточняется в соответствии со значениями давления, направлением и скоростью ветра на этих станциях.

Климатические характеристики (при наличии) также могут быть использованы при уточнении пределов, в которых меняются значения метеорологических элементов в данном районе в различное время года. Климатические данные позволяют оценить вероятность возникновения какого-либо опасного явления погоды в зависимости от предшествующих значений метеорологических элементов. Такие зависимости находятся по многолетним данным и могут использоваться синоптиком при составлении прогноза не только в районе, для которого они разработаны, но и в других районах с такими же физико-географическими условиями.

Значительную помощь при определении погодных условий в районах с восстановленной синоптической обстановкой, а также при прогнозе синоптического положения и погодных условий оказывает учет климатического районирования, знание наиболее типичных схем синоптических процессов по сезонам и месяцам; основных траекторий движения барических образований, наиболее характерной скорости их перемещения; климатических характеристик типов погоды в конкретных синоптических ситуациях; наиболее благоприятных синоптических положений, при которых возникают опасные явления погоды; распределение основных метеорологических элементов и опасных явлений погоды у земли и на высотах по месяцам.

Прогноз синоптического положения и эволюции синоптических объектов

При прогнозе синоптического положения по восстановленным картам погоды используются приемы экстраполяции, а также связи между структурой облачного поля циклонов на спутниковых снимках, направлением и скоростью их перемещения.

Если в распоряжении синоптика имеются хотя бы две восстановленные карты погоды за последовательные сроки или два последовательных снимка облачности, то можно определить направление, скорость движения и эволюцию синоптического объекта, а используя приемы прямолинейной экстраполяции, спрогнозировать будущее синоптическое положение.

Если кроме восстановленной приземной карты погоды или снимка облачности имеется восстановленная карта АТ-500, то для прогноза синоптического положения можно использовать правило ведущего потока. Также при прогнозе, кроме экстраполяции, целесообразно использовать связь между структурой облачного поля циклонов на спутниковых снимках и направлением и скоростью их перемещения.

При этом необходимо учитывать, что если поле облачности приобрело спиралевидную форму, то очаг роста давления занимает, как правило, переднюю часть безоблачной спирали за полосой облаков холодного фронта или фронта окклюзии, а очаг падения давления находится в пределах наиболее активной части облачной спирали.

Для уточнения синоптической обстановки, восстановленной синоптическим методом, используем карту нефанализа (рис. 6).

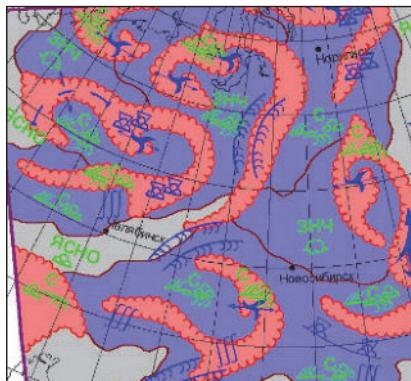


Рис. 6. Пример карты нефанализа

Используя правила барических тенденций, можно определить направление перемещения циклона. Для оценки скорости перемещения циклона можно привлечь данные о конфигурации облачных спиралей. Основным критерием здесь является степень асимметрии спиралей. По облачным вихрям, имеющим более сложную структуру, определять направление и скорость движения циклонов нецелесообразно. Но если удается оценить эволюцию облачной системы по последовательным снимкам, то можно несколько уточнить скорости движения циклонов и дать прогноз дальнейшего его преобразования.

При прогнозе перемещения фронтов с помощью данных об облачности, особенно к перемещению холодного фронта и фронта окклюзии, необходимо учитывать, что фронт движется в направлении вектора, проходящего от зоны прояснения за фронтом к фронтальной облачной полосе. Чем резче выражено прояснение за фронтом, тем он более подвижен.

Наличие на снимке облачного вихря, состоящего из одной облачной спирали, связанной с фронтом окклюзии и холодным фронтом, говорит о том, что в последующие сутки циклон не будет претерпевать существенных изменений и будет перемещаться со сравнительно небольшой скоростью.

Если в течение предыдущих суток облачный вихрь становился более симметричным, появились облачные спирали, связанные со вторичными фронтами, а сам вихрь изолировался от основных фронтальных облачных полос, то это служит признаком того, что в последующие сутки циклон у поверхности земли будет заполняться. Однако вихрь, связанный с высотным циклоном, может существовать еще в течение нескольких суток.

Некоторые изменения структуры облачного поля могут служить признаком появления, обострения или размывания атмосферных фронтов.

Аналогичным образом следует учитывать и эволюцию фронта окклюзии. Различие состоит лишь в том, что процесс трансформации облачной системы фронта окклюзии происходит медленнее, чем холодного фронта.

Особое внимание в летний период стоит обращать на появление в тылу циклонического вихря облачных спиралей, состоящих из кучевообразных облачков, это может послужить признаком обострения в последующие сутки вторичных фронтов [1].

Заключение

Приведенные в данной работе рекомендации могут помочь синоптику при восстановлении синоптической обстановки в районе с редкой сетью метеорологических данных с целью анализа синоптической ситуации при составлении прогнозов различной заблаговременности. Данная работа будет продолжена, предполагается разработать лабораторную работу для студентов вузов, обучающихся по профильным направлениям.

Список литературы

1. Воробьев В. И. Основные понятия синоптической метеорологии : учеб. пособие. СПб. : Российский государственный гидрометеорологический университет, 2003. 48 с.
2. Методы восстановления синоптического положения и условий погоды : учеб. пособие. М. : Воениздат, 1983. 128 с.
3. Наставление по метеорологической службе авиации Вооруженных Сил (НАМС-2014). Введено в действие приказом главнокомандующего ВКС от 29 нояб. 2014 г. № 434дсп.
4. Практические рекомендации по прогнозу погоды в районе восстановления: Методические указания. СПб, 2006. 10 с.

УДК 551.583

Климатические условия Иркутской области

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru), К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru),
Е. Ю. Золотухина (musakutlarylet@bk.ru), Н. С. Москалев
(nikolay.moskalew@list.ru), П. А. Мустаева (mustaeva.p@mail.ru)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Обсуждаются современные тенденции и причины изменений климата. Основное внимание уделяется исследованию пространственных и временных особенностей в распределении температуры и относительной влажности воздуха у поверхности Земли на территории Иркутской области по данным сети метеорологических станций. Многолетняя динамика средних температур рассматривается на примере календарных сезонов года. Отмечается увеличение числа случаев, когда положительные аномалии средних температур сохраняются 2 или 3 месяца за календарный сезон. Анализируются метеорологические условия формирования засушливых периодов, определяющих условия вегетации растений, особенно в степных и полустепных районах юга Иркутской области. В качестве последствий региональных изменений климата выделяется увеличение числа случаев с сильными грозами, ливнями и ветром в Иркутской области на примере летних месяцев 2022 г.

Ключевые слова: климат, аномалии, температура, относительная влажность, грозы, засухи, сильный ветер.

Введение

Современные тенденции изменений климата сопровождаются стремительным ростом числа гидрометеорологических аномалий. Согласно результатам численного моделирования с учетом естественных и антропогенных факторов в результате быстрого потепления в последние десятилетия земная климатическая система достигла режима, сопоставимого с режимом оптимума голоцен [3].

Необходимо отметить, что региональные климатические изменения в отличие от глобальных нередко характеризуются большей пространственно-временной неоднородностью в распределении метеорологических величин, что можно объяснить более сложной динамикой атмосферных процессов на фоне неоднородного рельефа. Не менее сложно оценить возможные причины наблюдаемых климатических изменений. Короткопериодные и долговременные изменения климатических параметров наряду с возросшим вкладом антропогенной составляющей тесно связаны с внешними и внутренними климатообразующими факторами [4]. Например, среди естественных факторов современных тенденций изменений климата на территории Беларуси рассматривают проявление квазишестидесятилетнего колебания, которое согласуется с динамикой Атлантического мультидекадного квазишестидесятилетнего колебания (АМО). Отмечается, что самые высокие значения температуры воздуха приходятся на высокие значения АМО. В последующие годы на нисходящей ветви АМО (2023–2043 гг.) может наступить уменьшение температуры воздуха в теплое время года по сравнению с предыдущим десятилетием. Зимой рост температур может поддерживаться за счет усиления форсинга парниковых газов [2]. Полученная эмпирическая модель регионального изменения температурного режима нижней атмосферы в Центральной Азии свидетельствует о процессе похолодания в приземном слое атмосферы, обусловленном, в первую очередь, влиянием солнечной активности [1].

Итогом сочетания различных факторов является формирование преобладающих условий тепло- и влагообеспечения подстилающей поверхности и приземного слоя атмосферы, которые в самых общих чертах можно свести к двум сценариям климатических изменений: потепление в сочетании с увеличением осадков (гумидизация, потенциально способствующая увеличению продуктивности зональных ландшафтов) и потепление в сочетании с сокращением осадков (аридизация, потенциально способствующая снижению продуктивности зональных ландшафтов). В частности, для большей части Европейской России, в том числе для Северного Кавказа, в настоящее время отмечается сценарий гумидизации [7].

Авторы работы [5] считают сочетание количества выпадающих осадков, влажности почвы и таяния снега ведущими факторами образования наводнений. Во многих регионах Европы, в том числе и на Европейской части России, обнаружены положительные тренды дождей большой интенсивности [8]. В последнем докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) указывается, что способствующие лесным пожарам метеорологиче-

ские условия, называемые в международной терминологии «fire weather» («пожароопасная погода» – жаркая, сухая и ветреная), становятся все более частыми во многих регионах планеты, и эта тенденция будет увеличиваться вследствие прогнозируемого глобального потепления [6].

Таким образом, наблюдаемые в настоящее время изменения климата характеризуются высоким риском образования опасных гидрометеорологических явлений, в том числе в различных регионах России, где темпы изменений климата выше глобальных. Это определяет необходимость проведения региональных климатических исследований, особенно по данным сети метеорологических станций и постов.

Результаты исследования

В качестве объекта исследования выбрана территория Иркутской области, где современные темпы изменений климата примерно вдвое выше, чем в целом по России. На территории Иркутской области расположена ст. Иркутск, которая имеет длинный ряд непрерывных метеорологических наблюдений и позволяет проанализировать многолетнюю динамику температурного режима за период, начиная с 1873 г. Выявлено, что в зимние месяцы, несмотря на превалирующий вклад положительных аномалий температуры воздуха, в последнее десятилетие отмечается уменьшение темпов роста средних температур воздуха и увеличивается повторяемость отрицательных температурных аномалий. Весной наиболее выражена тенденция потепления климата в марте, а межгодовая изменчивость температур в мае. Ярким примером служат аномалии средних температур, которые в мае 2021 г. в Иркутске составили $-1,8^{\circ}\text{C}$, а в мае 2022 г. $+3,0^{\circ}\text{C}$ (рис. 1). В летние месяцы потепление началось позже по сравнению с зимним периодом, темпы потепления климата оказались в 2–3 раза ниже. Однако они более устойчивые во времени и максимально выражены в начале лета. Осенью темпы потепления климата постепенно возрастают, достигая максимальных значений в ноябре. Ярким примером проявления положительных аномалий явился ноябрь 2021 г., когда его средние месячные температуры были на $2,9^{\circ}\text{C}$ выше климатической нормы, а в отдельные дни аномалии средних суточных температур воздуха превышали $+12^{\circ}\text{C}$.

Более детальный анализ показал, что, начиная с 1990-х гг., в Иркутске преобладают теплые зимы, когда два, а в отдельные годы все три зимних месяца имеют положительные отклонения от средних многолетних значений. Примером можно назвать аномально теплые зимы 2019 и 2020 гг. Весной при более частых вторжениях арктических воздушных масс в последнее десятилетие вновь возросла повторяемость отрицательных аномалий средних температур. Летом аналогично зимнему периоду растет повторяемость положительных аномалий средних месячных температур воздуха, а осенью наряду с положительными температурными аномалиями возросло число случаев, когда все три осенних месяца имели значения, близкие к средним многолетним значениям.

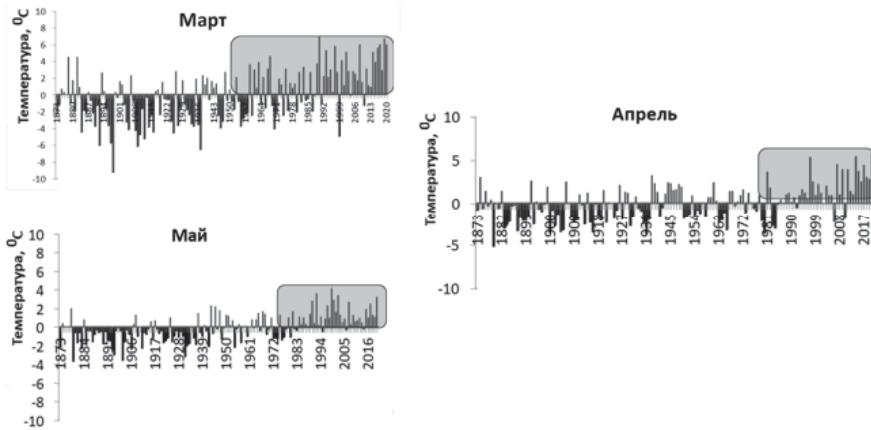


Рис. 1. Изменение аномалий средних месячных температур воздуха на ст. Иркутск в 1973–2020 гг.

Современные тенденции изменений температурного режима тесно связаны с характеристиками влажности воздуха. В этой связи были проанализированы пространственно-временные особенности распределения относительной влажности воздуха, которая является одним из основных критериев образования засух. Поэтому основное внимание уделялось периоду вегетации растений, который определяет количественные показатели урожайности сельскохозяйственных культур. По данным 80 метеорологических станций Иркутской области в последнее десятилетие в начале весны наименьшие значения относительной влажности воздуха фиксируются на метеорологической станции Алыгдже, которая подвержена отепляющему феновому эффекту на подветренных склонах Восточного Саяна и прибайкальской станции Еланцы. Наибольшие значения относительной влажности воздуха весной отмечаются на территориях Киренского и Казачинско-Ленского районов. В апреле и мае минимальные значения относительной влажности отмечаются на станциях Иркутск, Баяндай и Усть-Ордынский, а максимальные значения на северном побережье оз. Байкал. В летние месяцы минимальные значения относительного влагосодержания зафиксированы в средней и северной части оз. Байкал и на ст. Усть-Ордынский, а максимальные на южном побережье оз. Байкал. В центральных и западных районах Иркутской области минимальные значения относительной влажности воздуха в теплый период года приходятся на июнь, на юге области и на побережье оз. Байкал самый сухой месяц – май, а в северных районах – июнь.

Учитывая, что животноводство и растениеводство – одни из основных направлений развития сельского хозяйства Иркутской области, были проанализированы данные по влагосодержанию воздуха в районах с наиболее высокими рисками засушливости климата – Баяндаевском, Боханском, Кутуликском, Новонукутском, Осинском и Усть-Ордынском районах Иркутской области. На

рис. 2 показаны средние значения сухих дней или дней с относительной влажностью $\leq 30\%$, которые учитываются при прогнозе засух. Видно, что чаще всего засушливые условия наблюдаются в Усть-Ордынском районе, а реже всего в Баяндаевском. В многолетней динамике увеличение засушливости климата весной прослеживается в Баяндаевском, Новонукутском и Усть-Ордынском районах, в июне в Новонукутском, Осинском и Усть-Ордынском районах, в июле в Боханском, Баяндаевском и Усть-Ордынском районах. В августе тенденция к увеличению засушливости выражена наиболее ярко по сравнению с другими месяцами теплого периода года. Она проявляется во всех южных сельскохозяйственных районах Иркутской области с максимумами значений коэффициентов линейного тренда в Боханском и Усть-Ордынском районах.

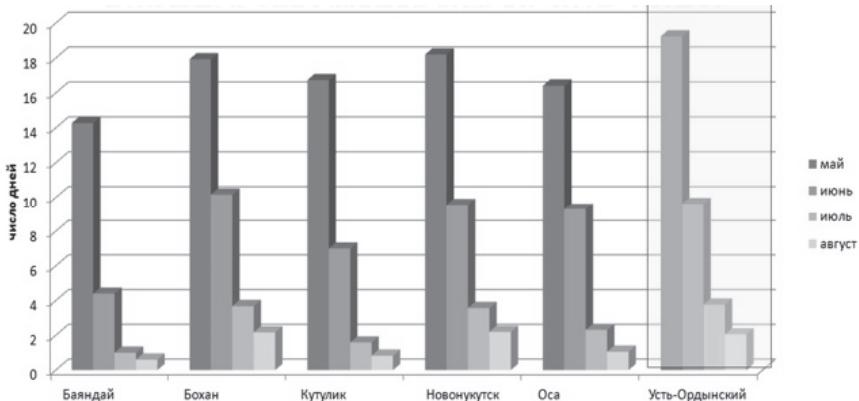


Рис. 2. Средние значения числа дней с относительной влажностью воздуха $\leq 30\%$ за 2015–2020 гг. на метеостанциях Иркутской области

Наряду с засухами современные тенденции температурно-влажностного режима отражаются в повторяемости и активности грозовых процессов, которые являются результатом развития термической и вынужденной конвекции. По данным 79 метеорологических станций Иркутской области за последнее десятилетие грозы в апреле – редкое явление, наиболее регулярно от одного до трех случаев в месяц они отмечались на ст. Шиткино, расположенной на левом берегу р. Бирюсы в Тайшетском районе. В мае максимальное среднее число дней с грозой составило 3 и отмечалось в Братском районе (ст. Кобляково) и Бодайбинском районе (ст. Мамакан). Летом максимум числа дней с грозой наблюдался на высокогорной станции Дабады в предгорьях Восточного Саяна. Реже всего летом грозы зафиксированы над относительно прохладным по сравнению с сушей побережьем оз. Байкал (станции Томпа и Баргузинский Заповедник). В сентябре максимум гроз в среднем составил 2 дня и отмечался на высокогорной станции Дабады и в Тулунском районе на станции Икей, а минимум на севере области. В процентном соотношении общее число дней с грозой по данным 79 метеорологических станций Иркутской области варьирует от 1 % в апреле до 32 % в июне

и 35 % в августе. В межгодовой динамике числа дней с грозой можно выделить слабо выраженную тенденцию уменьшения числа дней с грозой в августе. Большое количество гроз отмечалось в сентябре 2019 г. на фоне положительных аномалий средних суточных температур и предшествующего большого количества летних осадков, интенсивные и продолжительные грозы отмечались в июле 2022 г.

Примером проявления современных изменений климата в погодных аномалиях на территории Иркутской области можно назвать лето 2022 г. 21 июня 2022 г. жители Черемховского района столкнулись с сильным градом. Сильная и продолжительная ночная гроза 19 июля в течение 2,5 ч наблюдалась на юге Иркутской области, а ураган с порывами ветра ≥ 34 м/с 23 июля 2022 г. вызвал ветровал в г. Киренске. Данный ветровал по площади, которая оценивается $>23\ 470$ га, занимает первое место среди известных ветровалов в Сибири и третье место среди ветровалов в России, вызванных конвективными явлениями в России за период с 2001 г. Все эти опасные погодные явления были связаны с развитием мощных конвективных облаков по типу «взрывной конвекции», когда за очень короткое время, как правило, менее часа, после интенсивного дневного прогрева грозовое облако достигает высоты 9–12 км и иногда даже пробивает задерживающий выше слой тропопаузы. Сильный ветер в Киренске отмечался при смещении с южными потоками мощной конвективной ячейки, сформировавшейся над северной оконечностью оз. Байкал. Сильный град в июне и интенсивная продолжительная гроза в июле были вызваны наличием мезомасштабного конвективного комплекса, получавшего развитие на подветренных склонах Восточного Саяна в условиях высокого тепло- и влагосодержания атмосферы при усиливении энергии конвективной неустойчивости за счет адвективно-динамических и вихревых факторов. Дополнительная влага на высотах летом 2022 г. поступала на территорию Иркутской области с морей Тихого океана. Также во вторую половину лета Иркутская область длительное время находилась под влиянием холодного полярного циклона, который, как известно, имеет высокие показатели напряженности электрического поля атмосферы.

Заключение

Современные тенденции изменений климата на территории Иркутской области характеризуются увеличением повторяемости теплых календарных сезонов, когда два или три календарных месяца имеют приземные температуры воздуха выше средних многолетних значений. Наиболее устойчивая тенденция роста средних температур отмечается в зимние и летние месяцы, в конце весны высокая вероятность арктических вторжений и формирования отрицательных температурных аномалий, а осенью температурные аномалии чаще становятся близкими к климатической норме. В летние месяцы в последнее десятилетие остается высокой вероятность засушливых периодов, преимущественно в степной и лесостепной зонах Иркутской области.

Наиболее грозоопасными районами остаются наветренные склоны высокогорных районов Восточного Саяна, где хорошо развиты вынужденные восход-

дящие движения, а также станции, расположенные вблизи Братского водохранилища, где усилено испарение влаги. Наименее вероятно образование гроз на побережье оз. Байкал, а в конце лета в крайних северных районах Иркутской области. В последнее десятилетие возросла повторяемость суперячейковых гроз, при прогнозировании которых важно учитывать мезомасштабные, адвективно-динамические и вихревые факторы развития конвекции, в том числе, по взрывному типу.

Список литературы

1. Региональные особенности и причины изменения климата в Кыргызстане / К. А. Каримов, Р. Д. Гайнутдинова, Г. Ш. Жунушова [и др.] // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2020. № 1. С. 22–26.
2. Логинов В. Ф. Современные изменения климата Беларуси // Фундаментальная и прикладная климатология. 2022. Т. 8, № 1. С. 51–74.
3. Махов И. И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92, № 1. С. 3–14.
4. Махов И. И., Смирнов Д. А. Эмпирические оценки вклада парниковых газов и естественной климатической изменчивости в тренды приповерхностной температуры для различных широт // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503, № 1. С. 53–59.
5. Blöschl G. Changing climate both increases and decreases European river floods // Nature. 2019. Vol. 573 (7772). P. 108–111.
6. Attribution of the Influence of Human-Induced Climate Change on an Extreme Fire Season / M. C. Kirchmeier-Young [et al.] // Earth's Future. 2019. Vol. 7. P. 2–10.
7. National report “Global climate and soil cover in Russia: manifestations of drought, prevention measures, control, elimination of consequences and adaptation measures (agriculture and forestry)” (ed. by R. S.-Kh. Edelgeriev). Moscow : Izd. MBA, 2021. Vol. 3. 700 p.
8. Recent trends in monthly temperature and precipitation patterns in Europe. Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions / I. B. Nilsen, A. K. Fleig, L. Tallaksen [et al.] // Proceedings of FRIEND-Water. 2014. Vol. 363. P. 132–137.

УДК 551.524.32+551.4.06:911.52

Распределение минимальной и максимальной температуры воздуха в апреле 2022 года на территории России и СНГ

П. М. Мазуркин (kaf_po@mail.ru)

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

Аннотация. По экстремальным температурам воздуха на 183 метеостанциях РФ и СНГ выявлена закономерность рангового распределения с коэффициентом корреляции 0,9981. При этом значения минимальной и максимальной температуры воздуха оказалось лучше помещать в один ряд распределения. Рассмотрение только положительных температур в отдельности для приращения температуры между смежными экстремумами на одной и той же метеостанции дало коэффициент корреляции 0,4353, а с учетом всех температур это же приращение дало формулу с коэффициентом корреляции 0,6038. Таким образом, ряд из отрицательных и положительных температур повысил адекватность модели на $0,6038 / 0,4353 = 1,39$ раза. В дальнейшем заслуживает внимания промежуток времени между смежными экстремумами на одной и той же метеостанции. Для повышения адекватности выявляемых закономерностей этот промежуток времени между экстремумами предлагается измерять в сутках.

Ключевые слова: температура воздуха, территория РФ и СНГ, экстремумы, закономерности.

Введение

В статье Л. Н. Паршиной [2] приведено описательная характеристика погоды в апреле 2022 г. по метеостанциям европейской и азиатской частей Российской Федерации и СНГ.

Однако нет закономерностей изменения температуры в среднем за апрель 2022 г. по всем 183 значениям минимальной и максимальной температуры воздуха.

В предисловии руководителя Росгидромета по актуальности отмечается следующее: «Доклады МГЭИК не могут дать полной и детальной картины региональных оценок изменений климата для каждой страны, которые необходимы для выработки и реализации на национальном уровне практических мер по уменьшению антропогенного влияния на климатическую систему и смягчению последствий изменений климата. И в этой связи многими странами в дополнение к работе в рамках МГЭИК выполняются национальные оценки применительно к своей территории ...» [3, с. 3].

Относительный вклад различных факторов воздействия меняется во времени. Имеются два периода потепления (1911–1940 и 1976–1997 гг.). В 2001–2010 гг. роль в охлаждении сыграло сокращение солнечной радиации [4].

Цель статьи – на примере таблиц, приведенных к статье Л. Н. Паршиной [2], выявить закономерности рангового распределения температуры по населенным пунктам России и СНГ в апреле 2022 г., а также приращение этой экстремальной температуры и интервала времени в годах от предыдущего экстремума.

Материалы и методы

В табл. 1 приведены: экстремальная температура в апреле 2022 г. t (отрицательные и положительные температуры в °C рассматриваются совместно в общем ряду распределения); температура в предыдущем экстремуме t_0 , °C; приращение температуры от предыдущего экстремума Δt , °C; промежуток времени от предыдущего экстремума до 2022 г. t , год.

Таблица 1
Экстремальные значения температуры в апреле 2022 г. на метеостанциях РФ и СНГ

№ п/п	Индекс стан- ции	Пункт	Апрель 2022 г.		Предыд. экстремум t_0 , °C	Прира- щение Δt , °C	Время t , год
			Ранг R	t , °C			
1	22602		180	-22,8	-22,3	-0,5	10
2	26298		177	-13,1	-11,8	-1,3	11
3	27113	Череповец	179	-17	-16,1	-0,9	64
4	25282	Мыс Ванкарем	182	-34,4	-34	-0,4	46
5	25399	Уэлен	181	-33,8	-28,5	-5,3	38
...
179	29645	Кемерово	35	26,9	24,4	2,5	2
180	29842	Новокузнецк	25	27,5	24	3,5	3
181	29974	Оленья Речка	123	15,6	15,2	0,4	2
182	30309	Братск	79	23,4	19,5	3,9	73
183	36038	Змеиногорск	25	27,5	26,8	0,7	40

Всего в табл. 1 образовались 183 строки, из которых 12 строк являются отрицательными значениями температуры, а остальные 171 относятся к положительным экстремумам. При моделировании вместе учитываются отрицательные и положительные экстремумы.

Вначале по убыванию температуры выполняется ранжирование значений ряда экстремальной температуры за апрель 2022 г.

Ранг ($R = 0, 1, 2, 3\dots$) отличается от места в рейтинге ($I = 1, 2, 3\dots$) добавлением цифры 0. Это позволяет всю положительную полуось абсцисс использовать при идентификации закономерностей. В Excel в программе РАНГ есть два вида ранжирования: 0 – ранжирование по убыванию (наибольшее значение показателя является лучшим); 1 – ранжирование по возрастанию (лучшим является наименьшее значение показателя). Код 0 ставится для позитивно направленных факторов «больше, то лучше», а код 1 – для ранжирования значений негативно направленных параметров «меньше-лучше».

В функции = РАНГ(C2;C\$2:C\$184;0) для программной среды Excel приняты условные обозначения: С – идентификатор ранжируемого столбца; C2, C\$2 – первая строка; C\$184 – последняя строка; 0 ∨ 1 – ранжирование по убыванию (0) или возрастанию (1). Ранжирование дает место I , а ранг будет равен $R = I - 1$ по убыванию экстремальных температур.

Приращение будет равно $\Delta t = t - t_0$. Промежуток времени вычисляется как разница между 2022 г. и годами предыдущего экстремума. Например, для станции № 22602 этот промежуток времени будет равным $\tau = 2022 - 2012 = 10$ лет.

Климат и погода имеют колебательную адаптацию. Различные колебания (асимметричные вейвлет сигналы) в общем случае записываются волновой формулой [1] вида:

$$y_i = A_i \cos(\pi x / p_i - a_{8i}), \quad A_i = a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}), \quad p_i = a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}}, \quad (1)$$

где y – показатель (зависимый фактор), i – номер составляющей модели (1), m – количество членов в модели (1), x – объясняющая переменная (влияющий фактор), $a_1\dots a_8$ – параметры модели (1), принимающие числовые значения в ходе структурно-параметрической идентификации в программной среде CurveExpert-1.40 [<http://www.curveexpert.net/>] по статистическим данным, A_i – амплитуда (половина) вейвлета (ось y), p_i – полупериод (ось x).

Результаты и обсуждение

По табл. 1 были выявлены пять типов закономерностей:

- 1) ранговое распределение отрицательных и положительных экстремумов;
- 2) приращение температуры по рангам экстремальной температуры;
- 3) приращение в зависимости от температуры апреля 2022 г.
- 4) приращение от положительной температуры апреля 2022 г.;
- 5) изменение времени от влияния экстремальной температуры апреля 2022 г.

Ранговое распределение экстремумов температуры

Такое распределение становится безотносительным к населенным пунктам и метеостанциям. Оно показывает последовательное понижение экстремальной температуры от максимума до минимума на территории РФ и СНГ. Для географической привязки необходимы координаты метеостанций.

После идентификации (1) была получена трехчленная формула (рис. 1) вида:

$$y=a^* \exp(-b^*x)-c^*x^d-e^* \exp(f^*x) \cos(\pi x/(g-h^*x)+i). \quad (2)$$

где коэффициенты:

$$a = 3,00761658400E+001; b = 2,81540925766E-003; \quad c = 1,10261023334E-031;$$

$$d = 1,51023618974E+001; \quad e = 1,35891700247E-002; \quad f = 6,43316423555E-002;$$

$$g = 9,26297839606E+002; \quad h = 3,38974116043E+000; \quad i = 7,06665194984E+000.$$

Первая составляющая формулы (2) является общеизвестным законом Мандельброта (в физике). Эта же экспоненциальная формула является законом Лапласа (в математике), законом Перла-Ципфа (в биологии) и Парето (в эконометрике). Второй член является степенной функцией и из-за отрицательного знака она направлена на рост отрицательной температуры.

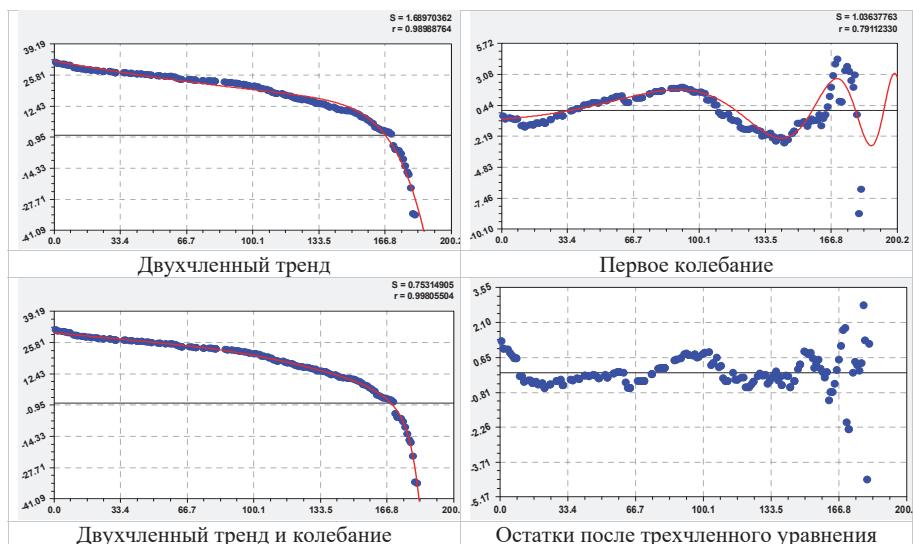


Рис. 1. Графики распределения по рангам значений экстремумов температуры (в правом верхнем углу: S – стандартное отклонение; r – коэффициент корреляции)

Сейчас в мире насчитывается около 10 тыс. метеостанций, из них 8500 располагаются в Северном полушарии; в России их 1600 (в перспективе ожидается 5400). И данные каждой станции – это один из тех маленьких кирпичиков, из которых складывается общая картина погоды на Земле, поэтому их работа очень

важна для повышения точности прогнозов, как краткосрочных, так и среднесрочных и на дальнюю перспективу. Тогда репрезентативность учтенного в данной статье количества метеостанций равна $100 \times 183 / 1600 = 11,44\%$.

Третий член также ориентирован на изменение отрицательной температуры. Колебание происходит при росте амплитуды по закону Мандельброта, при этом происходит резкое снижение периода колебания. Таким образом, климатическая система России и СНГ идет в разнос, т. е. поведение экстремальной температуры на 183 метеостанциях показывает поведение погоды в апреле 2022 г. по аналогии с протеканием аварии в двигателе внутреннего сгорания. Колебание растет по амплитуде и учащается по частоте.

Остатки показывают возможность дальнейшего вейвлет-анализа.

Распределение приращения по рангам экстремальной температуры

Этот параметр показывает разницу между двумя экстремальными температурами на одной метеостанции. Тогда в качестве объясняющей переменной можно принять ранги экстремумов температуры.

После структурно-функциональной идентификации была получена (рис. 2) формула:

$$y=a^* \exp(-b^*x^c) - d^*x^e - f^*x^g * \exp(-h^*x) * \cos(\pi i * x / (i-j*x^{0.99970}) + k). \quad (3)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= 3,40312055116E+000; & b &= 2,51695331218E-001; & c &= 2,45159941987E-001; \\ d &= 2,88801694748E-032; & e &= 1,42334869193E+001; & f &= 7,47530228971E-028; \\ g &= 2,02389725976E+001; & h &= 3,36656183435E-001; & i &= 2,73012292902E+001; \\ j &= 1,77601433980E-001; & k &= 1,11974502790E+000. \end{aligned}$$

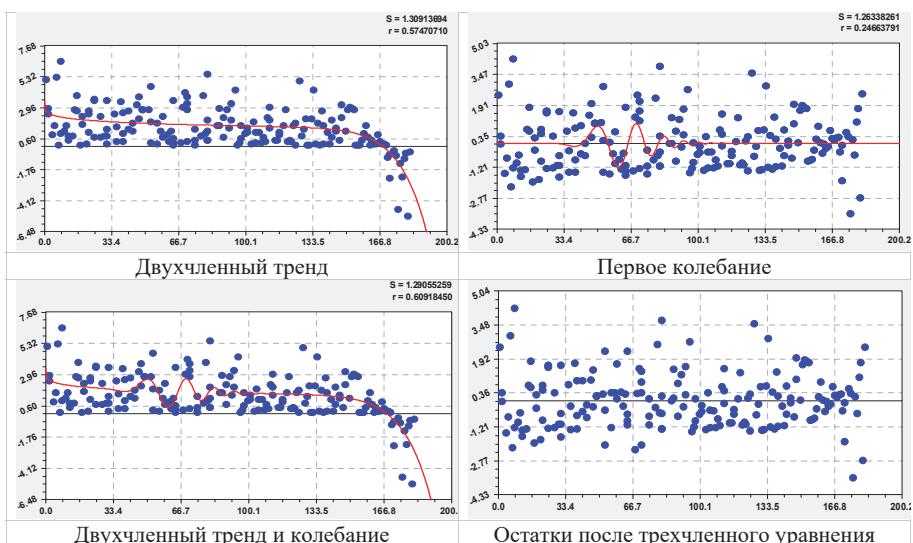


Рис. 2. Графики распределения приращения по рангам экстремумов температуры

Здесь первым членом становится модифицированный нами закон Мандельброта при условии $c \neq 1$, т. е. при $c = 2.45159941987E-001$. Второй составляющей является степенная функция. А третьим членом выступает асимметричный вейвлет с амплитудой, изменяющейся по биотехническому закону [1]. Такой вейвлет называется конечномерным, так как по графику на рисунке 2 имеет четкие границы волны (вейвлет (2) становится бесконечномерным).

Приращение в зависимости от температуры апреля 2022 г.

Уравнение (4) показывает изменение разницы между экстремальными температурами на одной и той же станции в зависимости (рис. 4) от последней экстремальной температуры в апреле 2022 г.:

$$\begin{aligned} y = & -a * \exp(-b * (x+50)) + c * (x+50)^d * \exp(-e * (x+50)^f) - \\ & g * x^k * \cos(\pi * x / (h+i * x) + j) + k * x^l * \cos(\pi * x / (l+m * x) - n). \end{aligned} \quad (4)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a = 3,11287598861E+000; \quad b = 5,21854531873E-003; \quad c = 9,13126792151E-010; \\ d = 1,27255289468E+001 \quad e = 6,35255203686E+000; \quad f = 3,79944091094E-001; \\ g = 2,08236260738E-002; \quad h = 2,01719985667E+000; \quad i = 3,06172977164E-003; \\ j = 8,23161059722E-001; \quad k = 5,18891207599E-004; \quad l = 3,35984090727E+000; \\ m = 5,04485571132E-003; \quad n = 2,52804233111E+000. \end{aligned}$$

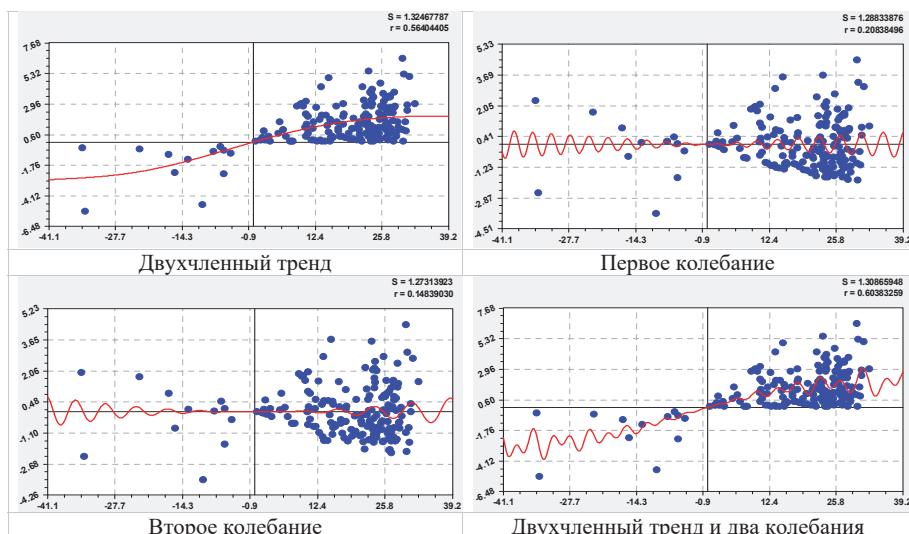


Рис. 3. Графики приращения в зависимости от экстремумов температуры

Для возможности моделирования в отрицательной полуплоскости координат в формуле (4) принято присваивание $x := x - 50$.

Перед первым членом появляется отрицательный знак. Он показывает, что по закону Мандельброта возрастает приращение с увеличением экстремальной

температуры, однако это рост происходит ниже оси абсцисс. Вторая составляющая является биотехническим законом и, по-видимому, показывает антропогенное повышение приращения температуры с повышением экстремальной температуры. Третий член дает рост противодействия положительному приращению по линейной амплитуде, но с возрастанием (снижение частоты) периода колебания. Тогда третий член является благоприятным для климатической системы РФ и СНГ.

На возрастание приращения температуры оказывает влияние четвертый член формулы (4) с амплитудой по квадратичной функции.

Приращение от положительной температуры апреля 2022 г.

Для упрощения закономерности за влияющую переменную принята только положительная экстремальная температура. После идентификации была получена (рис. 4) трехчленная модель:

$$y=a*x^b-c*x^d*exp(-e*x)*cos(pi*x/(f-g*x^h)+i)-j*x^k*exp(-l*x^m)*cos(pi*x/(n+o*x^p)-q). \quad (5)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= 1,72032652011E-001; & b &= 7,34077092961E-001; & c &= 2,57922470837E-022 \\ d &= 4,26805656812E+001; & e &= 4,79171031720E+000; & f &= 5,02084761608E+000 \\ g &= 1,41904132111E-003; & h &= 2,76549422420E+000; & i &= 2,27899655510E+000 \\ j &= 1,39764021160E-005; & k &= 1,36652760544E+001; & l &= 7,29369193046E+000 \\ m &= 4,76063697716E-001; & n &= 5,43380891291E-001; & o &= 1,96178696791E-002 \\ p &= 7,50169941879E-001; & q &= 2,0833031691E+000. \end{aligned}$$

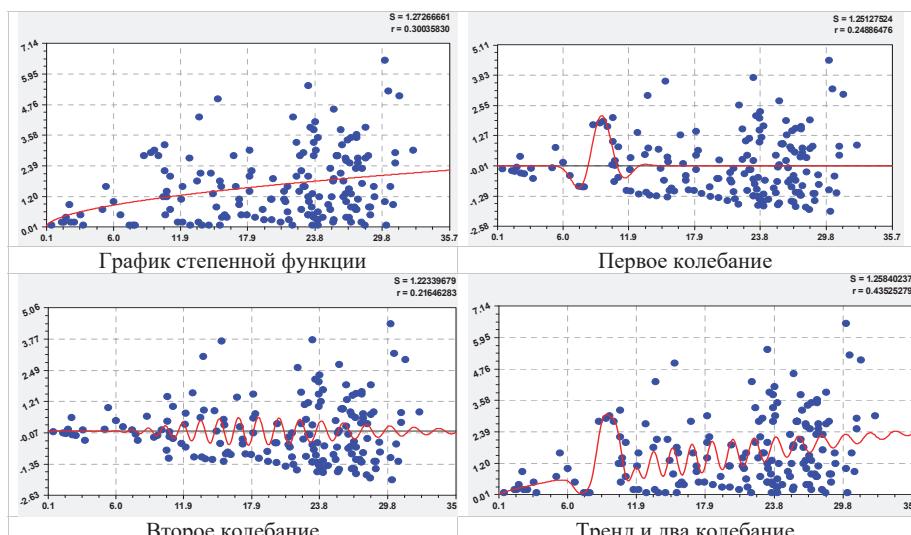


Рис. 4. Графики приращения от положительных экстремумов температуры

Первая составляющая приобретает конструкцию степенной функции. Как видно из первого графика, разброс относительно тренда возрастает с увеличением экстремальной температуры. Это факт указывает на то, что климатическая система расшатывается с увеличением дисперсии приращения температуры между экстремумами.

Обе следующие волны направлены на противодействие росту приращения. При этом амплитуды изменяются по биотехническому закону и тогда колебания становятся конечномерными. Иначе говоря, эти две волны противодействия, по-видимому, образовались из-за колебательной адаптации самой климатической системы РФ и СНГ.

Однако полупериоды колебаний разнонаправлены. Если в первом вейвлете происходит учащение за счет снижения полупериода, то во втором вейвлете, наоборот, происходит успокоение колебания от роста полупериода.

Изменение времени от экстремальной температуры апреля 2022 г. Это новый метеорологический параметр до сих пор подробно не изучен.

Вначале было получено (рис. 5) трехчленное уравнение:

$$y=a \cdot \exp(-b \cdot (x+50)^c) + d \cdot (x+50)^e - f \cdot (x+50)^g \cdot \exp(-h \cdot (x+50))^* \\ * \cos(\pi \cdot (x+50)/(i-j \cdot (x+50)^k) + l). \quad (6)$$

где коэффициенты:

$$a = 4,48311504234E+001; b = 2,83582899665E-005; c = 2,24693836634E+000; \\ d = 9,81348874119E-030; e = 1,59183119666E+001; f = 7,59175269553E-020; \\ g = 1,84861362777E+001; h = 5,09615142590E-001; i = 8,01493691563E+000; \\ j = 4,38569208839E+000; k = 6,38315639294E-002; l = 4,97804010324E+000.$$

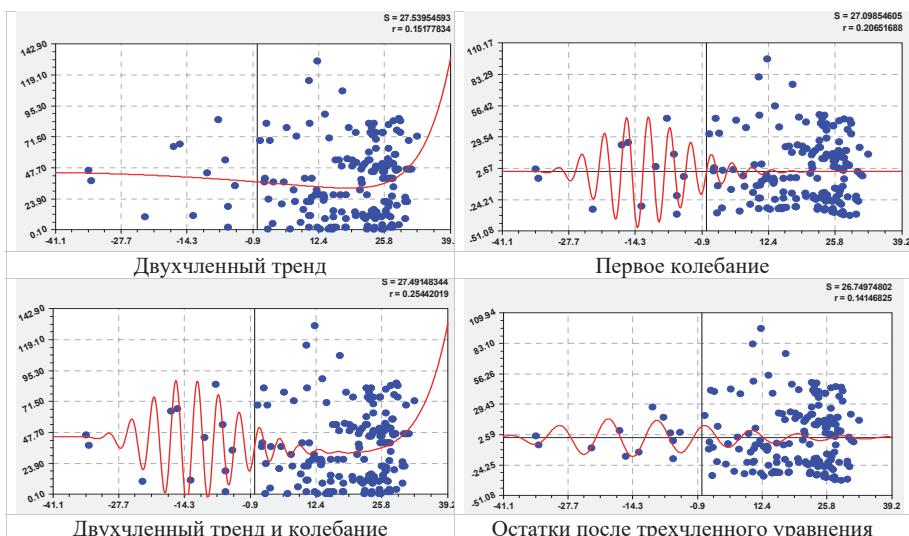


Рис. 5. Графики времени в зависимости от экстремумов температуры

Затем по остаткам от модели (6) выявлен последующий член (рис. 5), который не удалось соединить с предыдущим уравнением, поэтому записывается отдельная формула

$$y=a^*(x+50)^b \exp(-c^*(x+50)) \cos(\pi^*(x+50)/(d-e^*(x-50))+f), \quad (7)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= 3,46686937295E-004; & b &= 4,31272420304E+000; & c &= 1,30099779507E-001; \\ d &= 4,90107993286E+000; & e &= 5,06373741274E-003; & f &= 5,83276969488E-001. \end{aligned}$$

Первый член уравнения (6) является законом Мандельброта, после модификации, и он показывает естественное стремление природы к снижению времени между экстремальными температуры на одной и той же метеостанции. Таким образом, налицо учащение роста частоты экстремальных температур на территории РФ и СНГ.

Второй член по степенной функции показывает резкое возрастание промежутка времени между экстремумами на одной и той же метеостанции в будущем. Однако, как видно из графика на рис. 4, разброс приращения температуры также возрастает и метеорологические данные поучают сильное скедастическое распределение.

Третий член (6) показывает преимущественное нахождение в области отрицательных температур. Полупериод медленно снижается со значения 16 °C.

По уравнению (7) происходит изменение конечномерного вейвлета на всем интервале изменения экстремальной температуры при нальном периоде колебания в 9,8 °C.

Выявленные закономерности по убыванию коэффициента корреляции располагаются в иерархии следующим образом:

- 1) 0,9981 ранговое распределение отрицательных и положительных экстремумов;
- 2) 0,6092 приращение температуры по рангам экстремальной температуры;
- 3) 0,6038 приращение в зависимости от температуры апреля 2022 г.;
- 4) 0,4353 приращение от положительной температуры апреля 2022 г.;
- 5) 0,2544 изменение времени от влияния экстремальной температуры апреля 2022 г.

Ранговое распределение получает уровень адекватности «сверхсильная связь» с коэффициентом корреляции более 0,95. На уровне средней силы факторной связи (0,5–0,7) находятся закономерности изменения приращений в зависимости от рангов и самой экстремальной температуры апреля 2022 г. Слабый уровень связи (0,3–0,5) получает зависимость приращения температуры от положительных значений экстремальных температур.

И, наконец, отсутствие факторной связи (менее 0,3) показывает изменение времени от экстремальной температуры. Для этой закономерности требуются дальнейшие исследования: например, в приложении к статье [2] приведены даты

появления экстремальной температуры в апреле 2022 г. Тогда предыдущий экстремум также нужно измерять по датам. Это позволит время между экстремальными температурами измерять не в годах, а в сутках.

Заключение

Впервые выявлены закономерности распространения экстремальной температуры в промежутках между двумя максимумами. Это позволило получить закономерность рангового распределения отрицательных и положительных экстремумов температуры с коэффициентом корреляции 0,9981. Необходимо обратить внимание на закономерности изменения с коэффициентом корреляции 0,6092 приращения температуры по рангам экстремальной температуры, а также с коэффициентом корреляции 0,6038 приращения температуры в зависимости от экстремальной температуры апреля 2022 г.

Первая составляющая формулы закономерности рангового распределения экстремальных температур является общезвестным законом Мандельброта (в физике). Эта же экспоненциальная формула является законом Лапласа (в математике), законом Перла-Ципфа (в биологии) и Парето (в эконометрике). Второй член является степенной функцией и из-за отрицательного знака она направлена на рост отрицательной температуры.

Сейчас в мире насчитывается около 10 тыс. метеостанций, из них 8500 расположаются в Северном полушарии; в России их 1600 (в перспективе ожидается 5400). Тогда репрезентативность учтенного в данной статье количества метеостанций равна $100 \cdot 183 / 1600 = 11,44\%$.

Третий член указанной закономерности также ориентирован на изменение отрицательной температуры. Колебание происходит при росте амплитуды по закону Мандельброта, при этом происходит резкое снижение периода колебания. Таким образом, климатическая система России и СНГ идет в разнос, т. е. поведение экстремальной температуры на 183 метеостанциях показывает поведение погоды в апреле 2022 г. по аналогии с аварийным остановом двигателя внутреннего сгорания. Колебание растет по амплитуде и учащается по частоте.

Изменение времени от влияния экстремальной температуры апреля 2022 г. по годам показал коэффициент корреляции всего 0,2544. Для повышения адекватности закономерности необходимо перейти к исчислению экстремальной температуры по датам, тогда время между наибольшими значениями температуры на метеостанции должно исчисляться в сутках.

Список литературы

1. Мазуркин П. М. Экономико-статистическое моделирование : учеб. пособие с грифом УМО РАЕ. Йошкар-Ола : Поволжский ГТУ, 2016. 276 с.
2. Паршина Л.Н. Погода на территории Российской Федерации в апреле 2022 г. // Метеорология и гидрология. 2022. № 7. С. 124–128.
3. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М. : Росгидромет, 2008. 29 с.
4. Causes of irregularities in trends of global mean surface temperature since the late 19th century / C. K. Folland [et. al.] // Science advances. 2018. Vol. 4, N 6. eaao5297. <https://doi.org/10.1126/sci-adv.aao5297>

УДК 551.524.32+551.4.06: 911.52

Закономерности динамики и взаимосвязей между среднемесячной температурой, количеством осадков и суточными максимальными осадками

П. М. Мазуркин (kaf_po@mail.ru), А. И. Кудряшова (Little-one7@yandex.ru)

Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

Аннотация. Климатическая геоморфология территории Йошкар-Олы охарактеризована как равнина с континентальным климатом. Методом идентификации асимметричных вейвлетов выявлены волновые трех или четырех членные уравнения динамики среднемесячной температуры (коэффициент корреляции 0,9703), месячных сумм выпавших осадков (0,5447) и максимальной суточной суммы выпавших осадков (0,6192) по месяцам за 1936–2022 гг. Затем выполнен факторный анализ трех указанных факторов и были выявлены сильные связи прямой (0,8097) и обратной (0,8259) зависимостей между месячными и суточными осадками. Предложенная методика позволяет провести вейвлет анализ и факторный анализ метеопараметров любых населенных пунктах, в которых имеются измеренные данные на сайте <http://www.pogodaiklimat.ru/history.php>.

Ключевые слова: город, температура, осадки, среднемесячные, 1936–2022, вейвлеты.

Введение

Беспрецедентная интенсификация экстремальных погодных условий мотивирует исследования для понимания долгосрочных климатических изменений [5]. Например, в статье [4] показана динамика температуры воздуха на поверхности суши в мире с 1880 г., дана так называемая линейная объективная оценка.

Сравнение изменчивости температуры поверхностного воздуха в трех связанных интеграциях модели «океан – атмосфера» за 1000 лет [3] также выполнено по линейным тенденциям. При этом измерения температуры поверхности являются самыми длинными во времени и надежными. Динамические ряды глобальной или региональной температуры поверхностного воздуха имеют основополагающее значение для исследований изменения климата [2]. Однако длинные ряды показывают явно колебательный характер изменения.

Цель статьи – на примере среднемесячной температуры воздуха, а также количества осадков и максимальных суточных осадков за 1936–2022 гг. в Йошкар-Оле показать возможности выявления нелинейных и волновых закономерностей динамики и факторного анализа.

Материалы и методы

Исходные данные для статистического моделирования были взяты из сайта [<http://www.pogodaiklimat.ru/history.php>].

В табл. 1 дан фрагмент массива исходных данных для моделирования среднемесячной температуры t ($^{\circ}\text{C}$) приземного слоя воздуха на высоте 2 м, полученные по измерениям на метеостанции в Йошкар-Оле за период 1936–2022 гг. (за 2022 г. девять месяцев). Здесь же приведены данные по ежемесячным

суммам выпавших осадков O (мм), а также по максимальным суточным суммам осадков в данном месяце O_c (мм).

За начало отсчета времени τ (лет) по динамическому ряду температуры был принят 1936 г. ($\tau = 0$). Для каждого месяца принимается свое конкретное время по выражению (Год – 1936) + месяц / 12. Здесь месяц принимается так: январь = 1; февраль = 2 и т. д. Тогда с января 1936 по сентябрь 2022 г. прошло 85,75 г., поэтому ориентировочный прогноз можно выполнить на горизонт прогноза, равный основанию прогноза, т. е. до 2022 + 85 = 2007 г.

В табл. 1 всего находится данные по трем метеорологическим параметрам за 1029 месяцев. Отсутствующие по некоторым клеткам данные были исключены из каждой из трех статистических выборок.

Таблица 1
Среднемесячные температуры, осадки и максимальные суточные осадки в Йошкар-Оле

Год	Январь			Июль			Декабрь	
	Время τ	Темпер. t	...	Время τ	Темпер. t	...	Время τ	Темпер. t
Средние месячные температуры воздуха на высоте 2 м, °C								
1936	0,0833	-8,3	...	0,5833	21,4	...	1	-4,6
1937	1,0833	-13,1	...	1,5833	19,5	...	2	-12,9
1938	2,0833	-11,9	...	2,5833	21,4	...	3	-15,5
...
2020	84,0833	-3,2	...	84,5833	20,7	...	85	-10,8
2021	85,0833	-10,3	...	85,5833	20,9	...	86	-9,7
2022	86,0833	-9,8	...	86,5833	20,2	...	—	—
Месячные суммы выпавших осадков в Йошкар-Оле, мм								
Год	Время τ	Осадки O	...	Время τ	Осадки O	...	Время τ	Осадки O
1936	0,0833	32	...	0,5833	63	...	1	21
1937	1,0833	9	...	1,5833	84	...	2	41
1938	2,0833	30	...	2,5833	0,1	...	3	9
...
2020	84,0833	47	...	84,5833	98	...	85	14
2021	85,0833	57	...	85,5833	36	...	86	39
2022	86,0833	62	...	86,5833	105	...	—	—
Максимальные суточные суммы выпавших осадков в Йошкар-Оле								
Год	Время τ	Осадки O_c	...	Время τ	Осадки O_c	...	Время τ	Осадки O_c
1936	0,0833	4	...	0,5833	25	...	1	5
1937	1,0833	1	...	1,5833	21	...	2	5
1938	2,0833	7	...	2,5833	0,1	...	3	3
...
2020	84,0833	8	...	84,5833	40	...	85	3
2021	85,0833	9	...	85,5833	16	...	86	12
2022	86,0833	11	...	86,5833	30	...	—	—

Асимметричные колебания (вейвлет-сигналы) в общем случае записываются волновой формулой [1] вида:

$$y_i = A_i \cos(\pi x / p_i - a_{8i}), \quad A_i = a_{1i} x^{a_{2i}} \exp(-a_{3i} x^{a_{4i}}), \quad p_i = a_{5i} + a_{6i} x^{a_{7i}}, \quad (1)$$

где y – показатель (зависимый фактор), i – номер составляющей модели (1), m – количество членов в модели (1), x – объясняющая переменная (влияющий фактор), $a_1 \dots a_8$ – параметры модели (1), принимающие числовые значения в ходе структурно-параметрической идентификации в программной среде CurveExpert-1.40 [<http://www.curveexpert.net/>] по статистическим данным, A_i – амплитуда (половина) вейвлета (ось y), p_i – полупериод колебания (ось x). Количество составляющих в модели (1) может достичь 180 и более.

Результаты и обсуждение

Вначале выявляются закономерности динамики каждого из параметров погоды. Затем проводится парное сопоставление (бинарные отношения) и составляется корреляционная матрица. По ней вычисляются суммы коэффициентов корреляции по строкам и столбцам, а затем определяются рейтинги влияющих переменных (по сумме в строках) и зависимых показателей (по сумме в столбцах). В конце вычисляется общая сумма по строкам и столбцам и после разделения на количество клеток определяется коэффициент коррелятивной вариации, позволяющий сравнивать между собой корреляционные матрицы у разных объектов исследования.

Динамика среднемесячной температуры. После идентификации в программной среде CurveExpert-1.40 по всем 1029 месяцам была получена трехчленная формула:

$$y=a \cdot \exp(b \cdot x) - c \cdot \exp(-d \cdot x^e) \cdot \cos(\pi \cdot x / 0,5 - f) + g \cdot \exp(-h \cdot x) \cdot \cos(\pi \cdot x / 0,25 + i). \quad (2)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= 2,12826478861E+000; & b &= 9,60015243482E-003; & c &= 1,64871391701E+001; \\ d &= 1,96906034473E-003; & e &= 8,89220525126E-001; & f &= 5,25319092242E-001; \\ g &= 1,00993646467E+000; & h &= 3,96043909899E-003; & i &= 8,57758830153E-001. \end{aligned}$$

Общий коэффициент трехчленной модели (2) равен 0,9703.

Первые член является трендом по закону Мандельброта. Это формула хорошо известна как закон Лапласа (в математике), Перла-Ципфа (в биологии) и Парето (в эконометрике).

Первая составляющая $a \cdot \exp(b \cdot x)$ показывает повышение среднемесячной температуры воздуха Йошкар-Олы с 1836 по 2022 г., т. е. за 86 лет, от влияния глобального потепления. Второй член с постоянным годичным циклом колебания, из-за отрицательного знака перед формулой, направлен против роста температуры. Она показывает снижение среднемесячной температуры по амплитуде. А третий член, направленный на рост температуры, является принципиально новым и показывает постоянный полугодовой цикл колебания температуры воздуха. Причем амплитуда колебания также снижается с годами по закону Мандельброта.

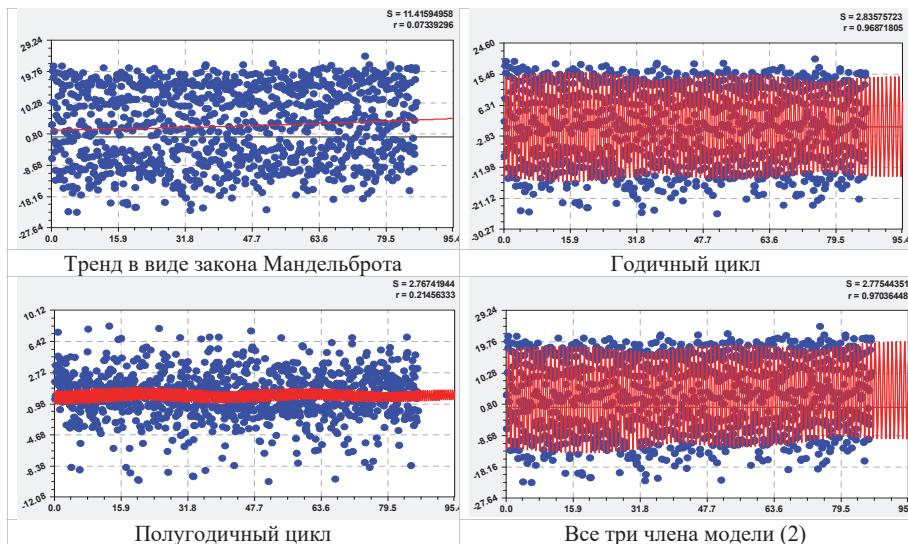


Рис. 1. Графики динамики среднемесячной температуры воздуха в Йошкар-Оле (в правом верхнем углу: S – стандартное отклонение; r – коэффициент корреляции)

Динамика месячных сумм выпавших осадков. Выявлено методом идентификации общей закономерности (1) четырехчленное уравнение (рис. 2) вида:

$$\begin{aligned} y = & a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot x^d \cdot \exp(-e \cdot x) - f \cdot \exp(-g \cdot x) \cdot \\ & * \cos(\pi \cdot x / 0.5 - h) + i \cdot \exp(j \cdot x) \cdot \cos(\pi \cdot x / 0.25 - k). \end{aligned} \quad (3)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a = & 3,54004275611E+001; b = 4,41102493793E-003; c = 9,57301706559E-006; \\ d = & 5,49029639236E+000; e = 1,87335472145E-001; f = 2,41849505924E+001; \\ g = & 4,07527567745E-003; h = 9,01047814412E-001; i = 3,25061982214E+000; \\ j = & 1,28843499559E-002; k = 7,46816725012E-001. \end{aligned}$$

Коэффициент корреляции уравнения (3) равен 0,5447, что находится на уровне средней силы факторной связи (0,5–0,7). Первый член снова является законом экспоненциального роста Мандельброта, а второй член тренда показывает наличие максимума месячных сумм выпавших осадков по биотехническому закону [1].

До достижения максимума среднемесячная температура влияет на месячные суммы выпавших в Йошкар-Оле осадков почти пропорционально. С дальнейшим ростом температуры, например, как это происходит в Республике Чувашия, количество осадков снижается и наступают летние засухи.

Годичный цикл работает также, как среднемесячная температура. А вот полугодичный цикл нарастает по амплитуде со временем.

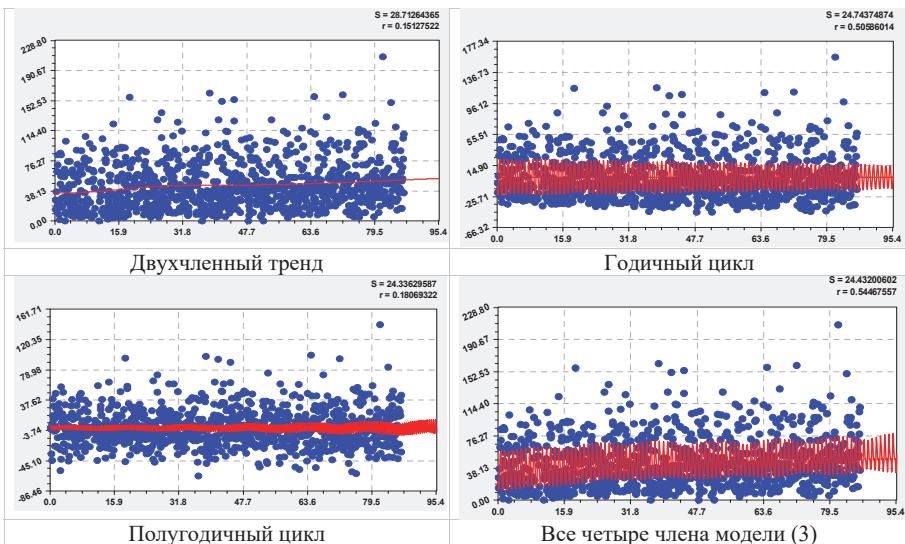


Рис. 2. Графики динамики месячных сумм выпавших осадков в Йошкар-Оле

Динамика максимальных суточных сумм выпавших осадков. Этот параметр с коэффициентом корреляции 0,6192 оказался выше по значимости динамики среднемесячной температуры 0,5447.

На рис. 3 показаны графики четырехчленной модели вида:

$$\begin{aligned} y = & a * \exp(b * x) + c * x^d * \exp(-e * x^f) - g * \exp(h * x)^* \\ & * \cos(\pi * x / 0,5 - i) + j * \exp(k * x) * \cos(\pi * x / 0,25 - l). \end{aligned} \quad (4)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a = & 9,69782713421E+000; b = 4,64197401894E-003; c = 1,34047585335E-005; \\ d = & 7,78259800810E+000; e = 1,75305609461E+000; f = 6,28253654224E-001; \\ g = & 7,40379908511E+000; h = 8,83331458522E-004; i = 7,38614174711E-001; \\ j = & 9,03264712521E-001; k = 1,63969464803E-002; l = 1,10239051188E+000. \end{aligned}$$

Здесь первый член по конструкции остался без изменения. Второй член по полному биотехническому закону также показывает максимум максимальных суточных сумм выпавших осадков. Годичный и полугодовой циклы по ориентации влияния также не изменились. Однако амплитуда по закону Мандельброта у обоих волн растет со временем от 1936 до 2022 г. Тогда параметр максимальных суточных сумм выпавших осадков является предпочтительным в сравнении с месячными суммами выпавших осадков.

Остатки после вышеуказанных формул показывают возможности дальнейшей идентификации асимметричных вейвлетов (1).

Далее рассмотрим парные факторные связи между тремя метеопараметрами.

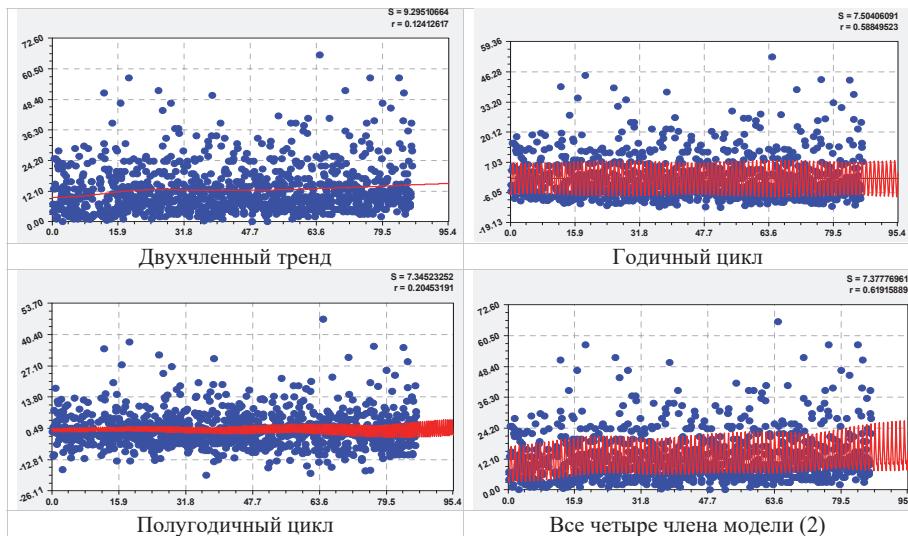


Рис. 3. Графики динамики максимальных суточных сумм выпавших осадков

Влияние среднемесячной температуры. На изменение месячных сумм выпавших осадков среднемесячная температура влияет (рис. 4) по степенной функции:

$$y=a^*(x+30)^b. \quad (5)$$

где коэффициенты:

$$a = 2,44308517250E+000; \quad b = 8,32306097877E-001.$$

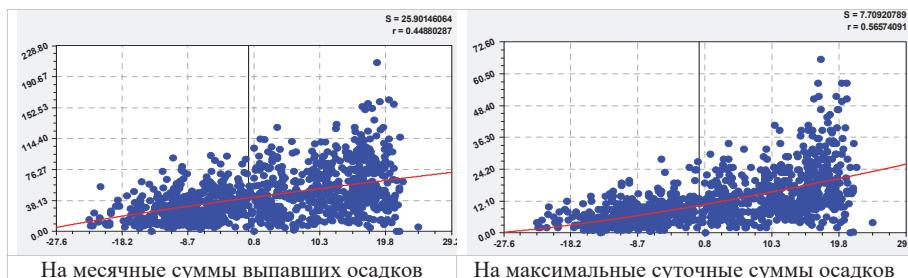


Рис. 4. Графики влияния среднемесячной температуры в Йошкар-Оле

Такая простая связь показывает, что из-за высокой лесистости территории Республики Марий Эл (54 %) еще не достигнут предел достижения максимума. А в Чувашии лесистость составляет всего 15 %, что позволило уменьшить осадки с резким увеличением температуры. В итоге формула (5) для Чувашии дополняется до биотехнического закона, т. е. степенная функция дополняется компонентом в виде закона Мандельброта.

На максимальные суточные суммы выпавших осадков среднемесячная температур влияет (рис. 4) также по степенной функции:

$$y=a^*(x+30)^b, \quad (6)$$

где коэффициенты:

$$a = 1,11371273371E-001; \quad b = 1,33740438258E+000.$$

Тогда можно сделать вывод о том, что климат Республики Марий Эл пока удовлетворяет условиям комфортной природной среды.

Влияние ежемесячных сумм осадков. На среднемесячную температуру оказывается влияние (рис. 5) по закону Вейбулла достижения предела:

$$y=a-b\exp(-c^*x^d). \quad (7)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= 1,81245406309E+001; & b &= 2,27820479765E+001 \\ c &= 1,82334249821E-003; & d &= 1,45801326309E+000. \end{aligned}$$

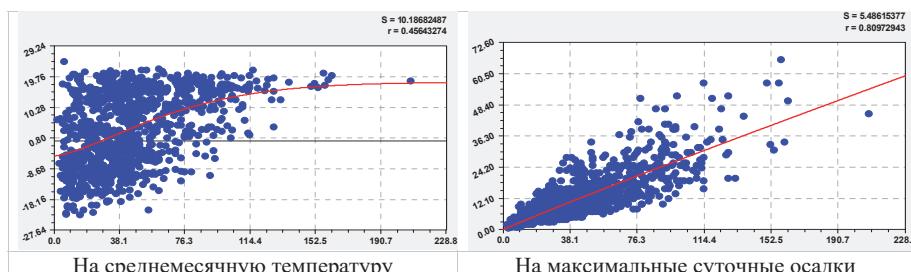


Рис. 5. Графики влияния месячных сумм выпавших осадков в Йошкар-Оле

Предельная среднемесячная температура равна для Йошкар-Олы $a = 1,81245406309E+001$ или $18,1^{\circ}\text{C}$. При нулевых месячных сумм выпавших осадков среднемесячная температура равна $18,1 - 22,8 = -4,7^{\circ}\text{C}$. А в пределе при $O \geq 180$ мм среднемесячная температура увеличится до $22,8^{\circ}\text{C}$.

Месячные суммы выпавших осадков влияют на максимальные суточные суммы выпавших осадков (рис. 5) по степенной функции:

$$y=a^*x^b. \quad (8)$$

где коэффициенты:

$$a = 3,28859416513E-001; \quad b = 9,57570433683E-001.$$

Между двумя параметрами осадков в условиях климата Йошкар-Олы пока соблюдается почти пропорциональная связь при $b = 9,57570433683E-001$ или $0,95757$, близкое к 1.

Влияние максимальных суточных сумм осадков. Бинарное отношение этого фактора (рис. 6) на среднемесячную температуру определяется законом Вейбулла:

$$y=a-b\exp(-c^*x^d). \quad (9)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= 1,60508775488E+001; & b &= 2,46617392142E+001; \\ c &= 1,96279514921E-002; & d &= 1,49055344658E+000. \end{aligned}$$

Здесь также соблюдается предел среднемесячной температуры 16,1 °C при достижении максимальных суточных сумм осадков до 50 и более мм/сутки.

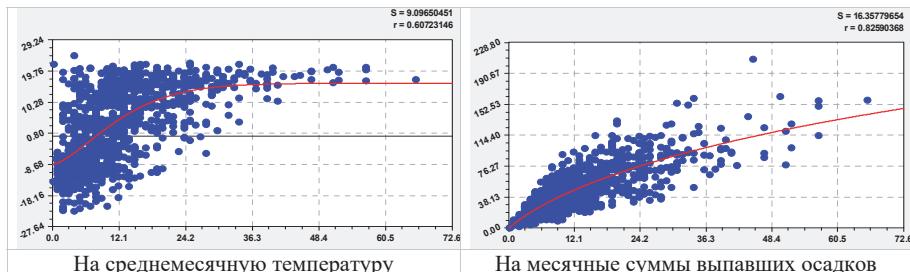


Рис. 6. Графики влияния максимальных суточных сумм осадков

Этот же параметр влияет на месячные суммы выпавших осадков (рис. 6) по биотехническому закону полной конструкции вида:

$$y=a^*x^b^*\exp(-c^*x^d). \quad (10)$$

где коэффициенты:

$$\begin{aligned} a &= 7,75921603894E+001; & b &= 1,38324423100E+000; & c &= 2,63164047963E+000; \\ d &= 1,62722771679E-001. \end{aligned}$$

Расчетами в Excel было получено, что максимум месячных сумм выпавших осадков наблюдается только при равенстве $O_c = O$ при 252 мм. Фактическое значение максимальных суточных сумм выпадения осадков равно около 65 мм, сутки. Месячная сумма выпавших осадков равна максимальной суточной сумме выпавших осадков только одни сутки в месяце. Такой климат характерен для пустыни Тар в Индии.

Факторный анализ метеопараметров. Составим общую табл. 2 результатов моделирования трех метеопараметров методом идентификации асимметричных вейвлетов.

Таблица 2

Факторный анализ трех метеопараметров в Йошкар-Оле за 1936–2022 гг.

Влияющая переменная x	Зависимый показатель y			Сумма $\sum r_x$	Место I_x
	t , °C	O , мм	O_c , мм		
Среднемесячная температура t , °C	0,9703	0,4488	0,5657	1,9848	2
Месячные суммы осадков O , мм	0,4564	0,5447	0,8097	1,8108	3
Максимальные суточные, осадки O_c , мм	0,6072	0,8259	0,6192	2,0523	1
Сумма $\sum r_y$	2,0339	1,8194	1,9946	5,8479	—
Место I_y	1	3	2	—	0,6498

Коэффициент коррелятивной вариации (термин коррелятивная вариация по Ч. Дарвину) по табл. 2 равен $5,8479 / 3^2 = 0,6498$, и он дает уровень адекватности «средняя факторная связь» (общий коэффициент корреляции для всей матрицы по табл. 2 находится в интервале 0,5–0,7). По этому критерию сравниваются разные объекты исследования, например, все столицы субъектов Российской Федерации. Сравнение объектов происходит по силе функциональной связности между всеми учтенными параметрами.

Из трех параметров как влияющая переменная в жизни населения Йошкар-Олы занимает место: первое O_c – максимальные суточные суммы осадков, мм/сутки; второе место t – среднемесячная температура, °C; третье место O – месячные суммы выпавших осадков, мм.

Из данных табл. 2 видно, что как зависимый показатель (критерий оценки) на первом месте находится t – среднемесячная температура, на втором O_c – максимальные суточные суммы осадков и на третьем O – месячные суммы выпавших осадков.

Таким образом, основными метеорологическими факторами становятся максимальные суточные суммы осадков и среднемесячная температура. Как влияющая переменная и как зависимый показатели они меняются местами.

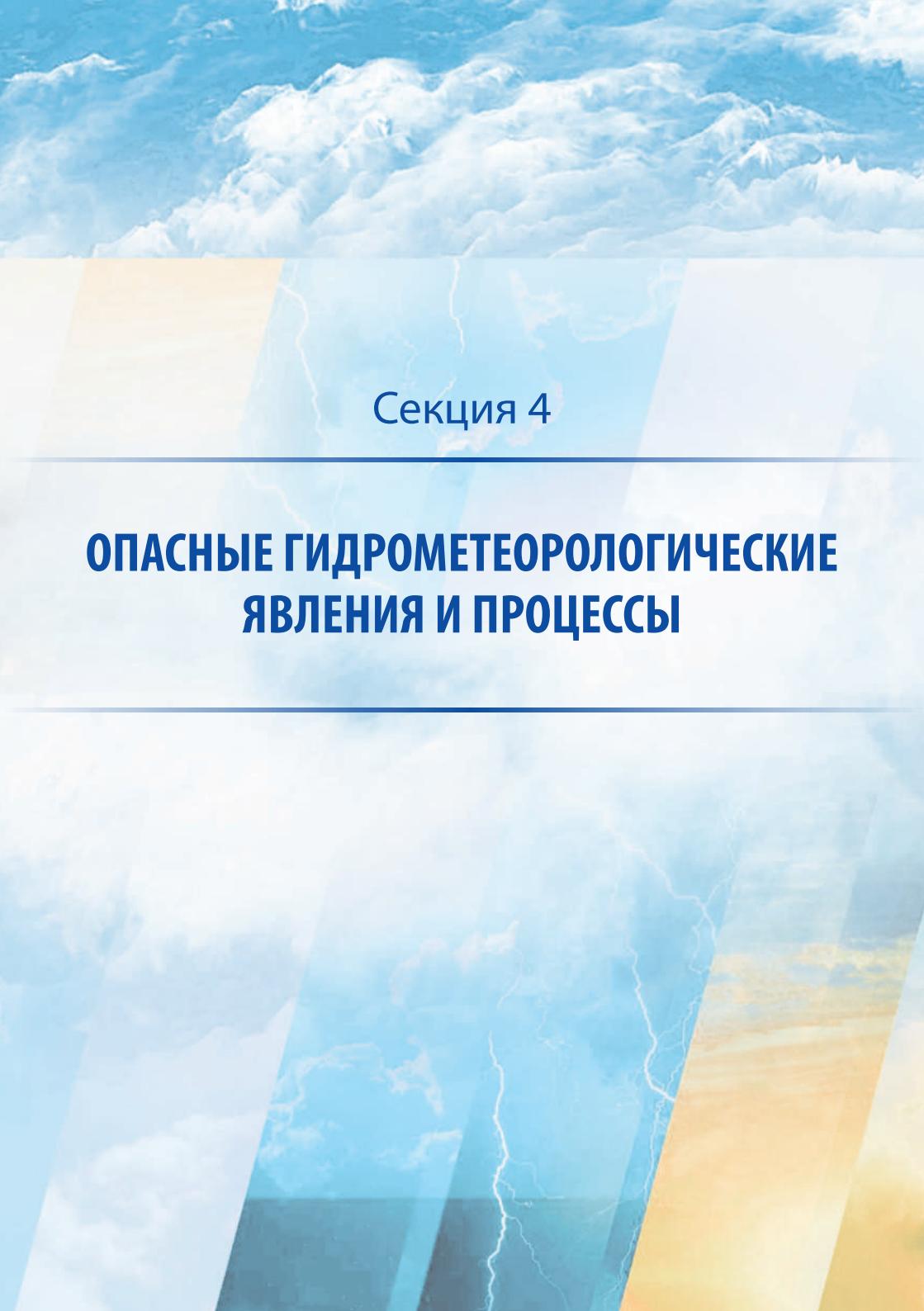
Заключение

На примере среднемесячной температуры, месячных сумм выпавших осадков и максимальной суточной суммы выпавших осадков в Йошкар-Оле, столице Республики Марий Эл, за время измерений 1936–2022 гг. были выявлены волновые закономерности динамики, соответственно, с коэффициентами корреляции 0,9703, 0,5447 и 0,6192. Динамика среднемесячной температуры моделируется на уровне адекватности «сверхсильная факторная связь» при коэффициенте корреляции более 0,95. Остальные два фактора получают уровень адекватности «средней силы» (0,5–0,7) факторной связи от влияния времени.

Из парных отношений между тремя факторами обращает на себя внимание влияние обратное влияние максимальных суточных осадков O_c на месячные суммы выпавших осадков O с коэффициентом корреляции 0,8259 (уровень адекватности «сильная связь»). Прямое влияние месячных сумм выпавших осадков на максимальные суточные суммы осадков характеризуется коэффициентом корреляции 0,8097 (также уровень сильной факторной связи).

Список литературы

1. Мазуркин П. М., Кудряшова А. И. Квантовая метеорология: факторный анализ трехчасовых измерений четырех метеорологических параметров за 2012–2018 годы // American Scientific Journal № (24). 2019. С. 15–28.
2. Li G. X., Zhou G. Comparisons of time series of annual mean surface air temperature for china since the 1900s: observations, model simulations, and extended reanalysis. 2016. <https://doi.org/10.1175/bams-d-16-0092.1>
3. Stouffer R. J., Hegerl G., Tett S. A Comparison of Surface Air Temperature Variability in Three 1000-Yr Coupled Ocean–Atmosphere Model Integrations // J. of climate. 1999. Vol. 13. P. 513–537.
4. Global land surface air temperature dynamics since 1880 / J. Wang [et. al.] // International Journal of Climatology. <https://doi.org/10.1002/joc.5384>
5. Quantifying changes in spatial patterns of surface air temperature dynamics over several decades / Zappalà D. A. [et. al.] // Earth Syst. Dynam. 2018. Vol. 9. P. 383–391. <https://doi.org/10.5194/esd-9-383-2018>



Секция 4

ОПАСНЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ

УДК 551.510.42

К вопросу о сравнении диагностики областей глубокой влажной конвекции и сопутствующих метеорологических явлений с использованием спутниковых данных и данных метеорологических радаров

А. Ю. Баданов (badanov@gismeteo.com), Ю. И. Юсупов (usupov@gismeteo.com)
ООО «НПЦ «Мэн Мейкер», Москва

Аннотация. Сверхкраткосрочные прогнозы (наукастинг) опасных конвективных явлений в настоящее время в основном производятся с помощью обнаружения этих явлений радиолокаторами и последующим перемещением зон этих явлений по экстраполяционному методу или по ведущему потоку. В связи с тем, что сеть метеорологических радаров покрывает не всю территорию России, а плотность расположения метеорологических радаров в зоне покрытия неодинакова, решение задачи оперативного прогноза опасных явлений, связанных с конвективными процессами в атмосфере, на всей территории России становится затруднительным. Использование данных, получаемых с геостационарных метеорологических спутников, помогает решить проблему, так как в зону видимости спутников попадает вся территория России. В работе представлено сравнение диагностики конвективных областей и сопутствующих метеорологических явлений при помощи данных геостационарных спутников и данных метеорологических радаров. Результаты могут быть использованы при краткосрочном прогнозе глубокой влажной конвекции и сопутствующих метеорологических событий.

Ключевые слова: глубокая конвекция, спутник, яркостная температура, метеорологический радар, гроза.

Ливни, выпадающие из облаков глубокой влажной конвекции, сопровождаются молниевыми разрядами, при этом нередко происходит развитие таких неблагоприятных или опасных явлений погоды как град, шквалы, иногда образуются смерчи. Все это, даже когда каждое из явлений не достигает критерия опасного гидрометеорологического явления, в сочетании может стать комплексом неблагоприятных условий погоды. Они могут нанести вред людям, животным, экономике, инфраструктуре. Очень сильные ливни могут привести к паводкам на реках, вызвать внезапные (быстро развивающиеся) наводнения. Интенсивная грозовая деятельность представляет большую опасность для авиации, как на эшелонах полетов воздушных судов, так и в зоне взлета и посадки. Своевременное прогнозирование опасных явлений, связанных с глубокой влажной конвекцией, чрезвычайно важно для авиации, а также для дорожно-транспортных, энергетических служб и аграрных компаний. Сверхкраткосрочные прогнозы (наукастинг) опасных конвективных явлений в настоящее время в основном производятся с помощью обнаружения этих явлений радиолокаторами и последующим перемещением зон этих явлений по экстраполяционному методу или по ведущему потоку [2].

В работах [3; 6] подчеркивается, что спутниковые снимки являются единственным оперативно доступным набором данных, который обеспечивает косвенное измерение неустойчивости и влажности с высоким пространственно-временным разрешением на большой территории.

Мультиспектральный спутниковый анализ сыграл важную роль в понимании свойств конвективных грозовых облаков: различные измерения на длинах волн в инфракрасном (ИК) диапазоне и комбинации между ними были использованы для оценки стадии развития облаков, высоты и температуры верхней границы облачности [3; 7–9].

Оценки неустойчивости и влажности наряду с другими характеристиками глубокой влажной конвекции возможно получить с помощью различных методов, применяемых к данным, полученным с помощью ИК-диапазонов спектра радиометров SEVIRI, установленных на спутниках Meteosat Second Generation (MSG) Европейского метеорологического сообщества., а также с помощью российских спутников Electro-L (GOMS-3).

На начальном этапе формирования конвективного явления отслеживание его развития имеет решающее значение для минимизации связанного с этим явлением ущерба за счет более раннего предупреждения. Используя преимущества высокой временной выборки MSG (один раз в 15 мин) и его широкий набор спектральных каналов, особенно три канала на длинах волн (6,2, 7,3, 10,8 мкм), возможно оценить степень конвективной активности [3–9].

В настоящей работе обсуждается способ диагностики мезомасштабных областей глубокой влажной конвекции, а также вероятности наличия в таких областях ливней, гроз и града с помощью информации, получаемой с метеорологических спутников.

В рассмотренном методе используются оценки трех параметров конвективного процесса: температура верхнего слоя облаков ($T_{ик}$), разность температур водяного пара ($T_{вп}$) и верхнего слоя облаков ($T_{ик}$), разность температур верхнего слоя облаков ($T_{ик}$) и температуры тропопаузы ($T_{пп}$). Кроме того, для решения задачи определения вероятности наличия того или иного явления, связанного с конвекцией, используется размер конвективной области (выраженный в пикселях спутникового изображения).

Область слабой активности характеризуется яркостной температурой ИК 10,8 мкм менее 233 К ($T_{ик} < 233$ К), а также положительной разницей яркостных температур водяного пара канала 6,2 мкм и канала 10,8 мкм ($T_{вп} - T_{ик} > 0$). Область сильной активности характеризуется наличием двух предыдущих параметров, а также отрицательными значениями $T_{ик} - T_{пп}$ ($T_{ик} - T_{пп} < -2$ К) [1].

Краткая схема алгоритма представлена на рис. 1.

На вход поступают яркостные температуры $T_{ик}$ (К) и $T_{вп}$ (К) на длинах волн 10,8 мкм и 6,2 мкм соответственно, а также темпера $T_{пп}$ (К) тропопаузы (см. рис. 1).

Конвективные облака имеют достаточно большое вертикальное развитие, иногда достигающее уровня тропопаузы или превышающее его. Вследствие

этого температура верхней части конвективного облака достаточно низкая. Разные авторы приводят различные граничные значения температуры верхней части облака, при которых его можно отнести к конвективному [11–15]. Облачный пиксель на спутниковом изображении считается принадлежащим конвективной области, если облако имеет сильное вертикальное развитие, и его верхняя граница состоит только из ледяных кристаллов. При этом температура облачности достаточно низкая ($T_{\text{ик}} < 233 \text{ K}$) [1; 3; 10].

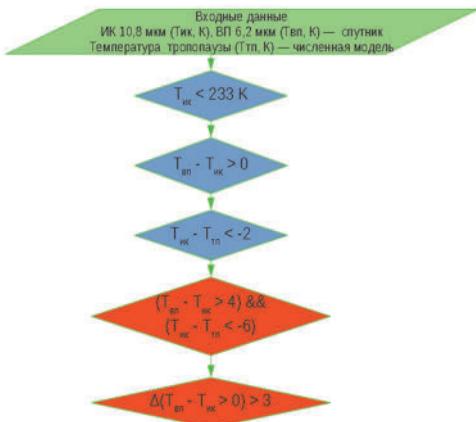


Рис. 1. Схема алгоритма определения конвекции по [3]

Следующий шаг алгоритма основан на том, что если верхняя граница развивающегося облака достигает тропопаузы, то блокируется проход излучения из тропосфера, при этом атмосферное излучение, регистрируемое спутником, складывается из излучений верхней границы облака и стратосфера. Фактическая разность между яркостными температурами $T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}}$ зависит от высоты верхней границы облака и количества водяного пара в стратосфере [3; 8]. Положительное значение этой разности рассматривается как индикатор глубокой влажной конвекции [16]. В работе [16] также указывается, что значение разности яркостных температур $T_{\text{вп}} - T_{\text{ик}}$ в пределе от 4 до 7 К можно рассматривать как индикатор подъема уровня водяного пара выше верхней границы облачности.

В качестве третьего параметра алгоритма проводится сравнение температур на основе метода, предложенного в работе [17]. Этот метод сравнивает температуру пикселей в канале с длиной волны 10,8 мкм с температурой тропопаузы, полученной с помощью расчетов по гидродинамической модели $T_{\text{ик}} - T_{\text{тр}}$. Информация о температуре тропопаузы включается в расчеты для определения «пробоя» тропопаузы. В данном подходе оставляются только пиксели, для которых $T_{\text{ик}} - T_{\text{тр}} < 2$ [3].

Следующий параметр метода служит для выбора пикселей с высокой конвективной активностью, оценивающейся с помощью комбинации параметров

$T_{\text{вп}} - T_{\text{ИК}}$ и $T_{\text{ИК}} - T_{\text{пп}}$. На этом этапе выделяются пиксели, в которых $T_{\text{вп}} - T_{\text{ИК}} > 4$ и верхняя граница облачности не менее чем на 6 К холоднее тропопаузы ($T_{\text{ИК}} - T_{\text{пп}} < -6$).

Эти пороговые значения были выбраны потому, что, как уже говорилось ранее, разность яркостных температур $T_{\text{вп}} - T_{\text{ИК}}$ выше, чем 4 К может считаться признаком сильных восходящих потоков, а верхняя граница облачности в ИК-канале на 6 К холоднее, чем тропопауза указывает на превышение уровня тропопаузы от $\sim 0,6$ до $\sim 0,9$ км, как при влажном адиабатическом градиенте 6,5 К/км [3].

В качестве исходных данных были рассмотрены показания геостационарных метеорологических спутников MSG-1, MSG-4, GOMS3, а также метеорологических радаров, получаемые круглосуточно с интервалом в 30 мин в период времени с 25 мая 2022 г. по 31 августа 2022 г. Для каждого момента времени и явления (глубокая влажная конвекция, ливень, град, гроза, шквал) согласно [18] были построены следующие таблицы сопряженности между показаниями спутника и радара (табл. 1).

Таблица 1

Прогноз (спутник)	Наблюдалось (радар)		Сумма
	Явление	Без явления	
Явление	n_{11}	n_{12}	n_{10}
Без явления	n_{21}	n_{22}	n_{20}
Сумма	n_{01}	n_{02}	n_{00}

Примечания: n_{11} – число оправдавшихся прогнозов факта явления, n_{12} – число неоправдавшихся прогнозов факта наличия явления, n_{21} – число неоправдавшихся прогнозов отсутствия явления, n_{22} – число оправдавшихся прогнозов факта отсутствия явления, n_{01} – число случаев с явлением, n_{02} – число случаев без явления, n_{10} – число прогнозов наличия явления, n_{20} – число прогнозов отсутствия явления, n_{00} – общее число прогнозов факта наличия или отсутствия явления для данной выборки. Также n_{ij} обозначает число узлов регулярной сетки.

Рассчитываются следующие характеристики успешности прогноза факта наличия (отсутствия) осадков (%):

$$U = \frac{n_{11} + n_{22}}{n_{00}} \times 100 \quad (1)$$

$$U_{oc} = \frac{n_{11}}{n_{00}} \times 100 \quad (2)$$

$$\Pi_{oc} = \frac{n_{11}}{n_{01}} \times 100 \quad (3)$$

$$U_{6.oc} = \frac{n_{22}}{n_{20}} \times 100 \quad (4)$$

$$\Pi_{6.oc} = \frac{n_{22}}{n_{02}} \times 100 \quad (5)$$

$$T = \frac{n_{11}}{n_{01}} - \frac{n_{12}}{n_{02}} \equiv \frac{n_{22}}{n_{02}} - \frac{n_{21}}{n_{01}} \quad (6)$$

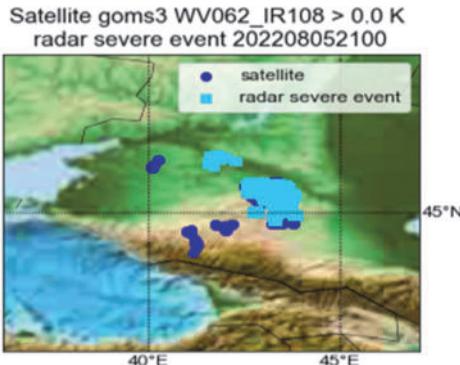
где U – общая оправдываемость прогноза осадков, U_{oc} – оправдываемость прогноза наличия осадков, Π_{oc} – предупрежденность факта наличия осадков, $U_{\bar{o}.oc}$ – оправдываемость прогноза факта отсутствия осадков, $\Pi_{\bar{o}.oc}$ – предупрежденность факта отсутствия осадков, T – критерий качества прогноза (критерий Пирси – Обухова).

Проиллюстрируем данную схему на примере сопоставления данных о конвекции по спутнику GOMS3 и метеорадару 05.08.2022 в 21.00 UTC (табл. 2, рис. 2). В данном случае спутниковый критерий конвекции $T_{WV6,2} - T_{IR10,8} > 0$.

Таблица 2

Конвекция (спутник)	Конвекция (радар)		Сумма
	Явление	Без явления	
Явление	257	312	569
Без явления	125	1049	1174
Сумма	382	1361	1743

Воспользовавшись выражениями (1)–(6) получаем следующие критерии оценки прогноза: $U = 74,93 \%$, $U_{oc} = 45,17 \%$, $\Pi_{oc} = 67,28 \%$, $U_{\bar{o}.oc} = 89,35 \%$, $\Pi_{\bar{o}.oc} = 77,08 \%$, $T = 44,25$.

Рис. 2. Сопоставление конвективных событий по радарам и спутниковому критерию $T_{WV6,2} - T_{IR10,8} > 0$

Далее, рассмотрим пример сопоставления данных о конвекции по спутнику GOMS3 и метеорадару 01.07.2022 в 23.00 UTC (см. табл. 2, рис. 2). В данном случае спутниковый критерий конвекции $T_{IR10,8} - T_{TP} < 0$, где T_{TP} – температура тропопаузы (табл. 3, рис. 3).

Таблица 3

Конвекция (спутник)	Конвекция (радар)		Сумма
	Явление	Без явления	
Явление	156	31	187
Без явления	66	142	208
Сумма	222	173	395

Воспользовавшись выражениями (1)–(6) получаем следующие критерии оценки прогноза: $U = 75,44 \%$, $U_{oc} = 83,42 \%$, $\Pi_{oc} = 70,27 \%$, $U_{\delta, oc} = 68,27 \%$, $\Pi_{\delta, oc} = 82,08 \%$, $T = 52,35$.

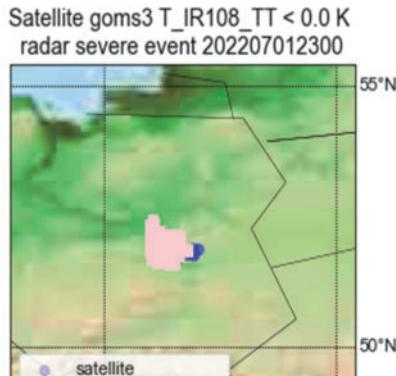


Рис. 3. Сопоставление конвективных событий по радарам и спутниковому критерию $T_{IR10,8} - T_{TP} < 0$

На рис. 4 показана зависимость критерия качества прогноза конвекции Т (коэффициент Пирси – Обухова) по спутниковому (с добавлением численного прогноза температуры тропопаузы) критерию $T_{IR10,8} - T_{TP}(K)$ от максимального значения данного критерия. Видно, что Т не принимает значение менее 0,3, что говорит об удовлетворительном качестве диагностики конвекции.

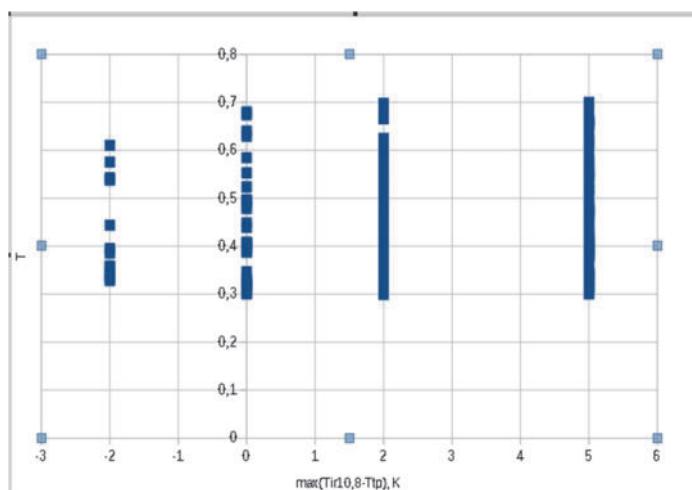


Рис. 4. Зависимость критерия качества прогноза конвекции Т (коэффициент Пирси – Обухова) от порогового значения $T_{IR10,8} - T_{TP}$

Таким образом, спутниковые критерии диагностики конвекции возможно применять при сверхкраткосрочном прогнозе (наукастинге).

Список литературы

1. Шицов А. Е., Горлач И. А. Алгоритм распознавания и мониторинга облачности глубокой конвекции по данным МИСЗ на основе целочисленного программирования // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2 (376). С. 39–59.
2. Юсупов Ю. И. Комплексная система наукастинга для авиации в технологии ГИС Метео // Метеоспектр. 2016. № 4. С. 72–81.
3. Carlos Pinto Da Silva Neto et al., A method for convective storm detection using satellite data/Atmósfera 29(4), 343–358 (2016)
4. The identification and verification of hazardous convective cells over oceans using visible and infrared satellite observations / F. D. Michael [et al.] // Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2008. Vol. 47, N 1. P. 164–184.
5. IR-based satellite and radar rainfall estimates of convective storms over northern Italy / R. Amorati [et al.] // Meteorol. Appl. 2000. Vol. 7. P. 1–18.
6. Roberts R. D., Rutledge S. Nowcasting storm initiation and growth using GOES-8 and: 65' GDWD // Weather Forecast. 2003. Vol. 18. P. 562–584
7. Satellite-observed cold-ring-shaped features atop deep convective clouds / M. Setvak [et al.] // Atmos. Res. 2010. Vol. 97. P. 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.03.009>
8. Monitoring deep convection and convective overshooting with Meteosat / J. Schmetz, S. A. Tjemkens, M. Gube, van de L. Berg // Adv. Space Res. 1997. Vol. 19. P. 433–441. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00051-3)
9. Heymsfield G. M., Blackmer R. H. Satellite-observerd characteristics of Midwest severe thunderstorm anvils // Mon. Wea. Rev. 1988. Vol. 116. P. 2200–2224
10. Rosenfeld D., Woodley W. L. Deep convective clouds with sustained supercooled liquid water down to -37. 5°C // Nature. 2000. Vol. 405. P. 440–442. <https://doi.org/10.1038/35013030>
11. Maddox R. A. Mesoscale convective complexes // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1980. Vol. 61. P. 1374–1387.
12. Velasco I., Fritsch J. M. Mesoscale convective complexes in the Americas // Journal of Geophysical Research. 1987. Vol. 92(D8). 9591. <https://doi.org/10.1029/jd092id08p09591>
13. Anderson C. J., Arritt R. W. Mesoscale convective systems over the United States during 1992 and 1993 // Mon. Wea. Rev. 1998. Vol. 126. P. 578–599.
14. Machado L. A. T., Rossow W. B. Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters // Mon. Weather Rev. 1993. Vol. 121. P. 3234–3260. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<3234:SCARPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<3234:SCARPO>2.0.CO;2).
15. Bedka K. Overshooting cloud top detections using MSG SEVIRI infrared brightness temperatures and their relationship to severe weather over Europe // Atmos. Res. 2011. Vol. 99. P. 175–189. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.001>
16. Setvak M., Rabin R. M., Wang P. K. Contribution of the modis instrument to observations of deep convective storms and stratospheric moisture detection in goes and MSG imagery // Atmos. Res. 2007. Vol. 83. P. 505–518. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2005.09.015>
17. Objective satellite-based detection of overshooting tops using infrared window channel brightness temperature gradients / Bedka K. M., Brunner J., Dworak R., Feltz W., Otkin J., Greenwald T. // J. Appl. Meteor. Climatol. 2010. Vol. 49. P. 181–202. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2286.1>

УДК 556.535.5.013

Особенности формирования заторов на Нижней Печоре в задачах разработки противозаторных мероприятий

Л. С. Банщикова (BanshchikovaLS@yandex.ru)¹, С. А. Агафонова (sv_ice@list.ru)², А. Э. Сумачев (a-sumachev@mail.ru)³

¹Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

³Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Рассмотрены условия формирования заторов льда на участке р. Печоры от впадения в Печорскую губу Баренцева моря на территории Ненецкого автономного округа до с. Усть-Цильма. Приведены схемы формирования заторов льда в зависимости от ледовых факторов. Результаты работ, выполненные в ходе исследований, могут быть использованы при разработке мер по предотвращению негативных последствий опасных ледовых явлений.

Ключевые слова: затор льда, противозаторные мероприятия, Нижняя Печора, ледовый режим.

Организация и проведение противозаторных мероприятий в соответствии с Федеральным законом № 68-ФЗ «О защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного техногенного характера» [13], Постановлением Правительства РФ от 30.12.2003 № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций» [14] является неотъемлемой частью ежегодной работы так называемых Противопаводочных комиссий. Выбор метода, целесообразность и эффективность методов должно быть основано на многофакторном анализе затороопасных участков, включающих в себя особенности гидрологического и ледового режима, морфометрическое строение русла и поймы, климатические факторы, а также антропогенное воздействие.

В то же время минимизация природных и экономических рисков, с точки зрения ожидания потерь возможна при учете антропогенного воздействия и степени освоенности затороопасных участков.

Согласно данным приведенным в [7] рассматриваемый участок р. Печоры, охватывающий часть нижнего течения реки – от с. Усть-Цильма и устьевую область реки Печоры включает пять затороопасных участков, три из которых относятся к нижнему течению реки Печора, а один – непосредственно устье.

Однако в работе [8] описано, что на устьевом участке р. Печоры процесс вскрытия представляет последовательную цепь подвижек, кратковременного движение ледяных полей, их остановку, подныривание и торошение отдельных льдин, т. е. формирования цепочки заторов. Разрушение одного небольшого затора приводит к формированию следующего ниже по течению. В рукавах дельты образуются заторы, имеющие оснований из сплошного и относительно прочного ледяного покрова. Под влиянием проникающих из моря приливов зимой в низовьях дельтовых рукавов формируются наледи, прочно скрепляющие ледяной покров с берегами островов дельты. По этой причине здесь не формируются закраины, и узкая зона подвижек льда примыкает к головной части затора.

Выполненный авторами анализ ледового режима по данным о ледовой обстановке, приведенным в гидрологических ежегодниках, показал, что разрушение ледяного покрова на устьевом участке выше Андегского узла начинается с закраин – полос открытой воды между ледяным покровом и берегом, образующаяся перед вскрытием реки, причем в последние годы продолжительность периода с закраинами значительно увеличилась и в среднем составляет порядка 10 дней. Особенности имеет прорыв заторов на устьевом участке. Он происходит не спонтанно, а подготавливается развитием процессов в массиве затора: течением ледового материала на его периферии, общей релаксацией напряжений, ослаблением взаимодействия с берегами при подъеме уровня воды, возрастанием напора льда, за счет ледохода выше затора, ростом высоты и крутизны стоячей волны. Импульсные подвижки массивов заторов приводят к постепенному разлому и дроблению части ледяного покрова в низовьях рукавов дельты, проекладыванию ледотранзитных каналов вдоль стрежней рукавов в направлении их выходов на устьевое взморье. Выноса речного льда в Печорскую губу не происходит, т. е. речной лед тает в дельте и на устьевом баре. Места заторообразования приурочены к сужениям русла, приверхам островов. Наиболее опасны заторы, формирующиеся в 2–3 км ниже г. Нарьян-Мар. [15]

В современных условиях ледовый режим Нижней Печоры меняется под действием изменений климата [12] при этом наблюдаемые изменения сроков ледовых явлений в пределах исследуемого участка наиболее выражены в створе с. Усть-Цильма. Сроки появления льда и установления ледостава сместились в сторону более поздних по данным поста Усть-Цильма на 5-е и 6-е сут. соответственно, для остальных створов – на 2–3-и сут. Смещение сроков окончания ледостава в сторону более поздних равномерно проявляется в пределах исследуемого участка. Изменение при сравнении двух периодов (1951–1980 и 1981–2019 гг.) составляет от 4 до 6 сут.

Характер процесса вскрытия реки в конкретный год определяется соотношением тепловых и механических факторов. Эти факторы действуют как при образовании затора, так и при его разрушении (прорыве). Первая группа определяет интенсивность таяния и потери прочности льда, вторая – взлом ледяного покрова, транспорт и торошение льдин. Прорыв затора происходит при увеличении расходов воды, но чем больше скопления льда теряют свою толщину и прочность, тем меньший расход воды требуется для разрушения затора [1]. Всесторонний анализ ледового режима р. Печоры показал, что в среднем начало разрушения ледяного покрова приходится на вторую–третью декаду мая. Весенний ледоход обычно начинается после одной или серии подвижек. Вскрытие р. Печоры в пределах исследуемого участка происходит в направлении к устьевому створу. В среднем разница между сроками вскрытия у с. Усть-Цильма и МГП Осколково составляет 17 сут. : за 6 дней ледоход распространяется от с. Усть-Цильма до с. Ермицы, еще за 6 дней от с. Ермицы до с. Оксино и за 3 дня от с. Оксино до г. Нарьян-Мар. В годы с ранним окончанием периода ледостава вскрытие нередко затягивается, разница между сроками у с. Усть-Цильма и у МГП Оскол-

ково может достигать 1 месяца. Важной особенностью ледового режима исследуемого участка р. Печора является ежегодное формирование заторов при прохождении весеннего ледохода. Продолжительность весенних ледовых явлений сокращается к устью, так средняя продолжительность у с. Усть-Цильма составляет 8 дней, у МГП Осколково – 2 дня. В среднем к концу мая река очищается ото льда. После разрушения льда в дельте начинается освобождение ото льда Печорской губы. При вскрытии развиваются две встречных полыньи: со стороны реки и со стороны моря, через проливы между островами Гуляевских кошек [10].

За период 1971–2019 гг. повторяемость заторов льда у ГП Усть-Цильма составила только 7 %, для ГП Оксине – 21 %, на ГП Оксине существенно увеличилась с 2004 г., при этом заторами часто обусловлены высшие годовые уровни воды [11].

Более детальный анализ основанный построении пространственно-временных графиков $H = f(L, t)$ [2–3], за многолетний период по ежедневным уровням воды за многолетний период [4–6] показал, что на устьевом участке р. Печора процесс вскрытия представляет последовательную цепь подвижек, кратковременного движение ледяных полей, их остановку, подныривание и торощение отдельных льдин, т. е. формирования цепочки заторов. Разрушение одного небольшого затора приводит к формированию следующего ниже по течению.

При этом построение пространственно-временных графиков выполнено отдельно для участка р. Печоры от с. Усть-Цильма до с. Оксине (схема *a*), а для дельты р. Печоры построены по двум схемам: (схема *b*). р. Печора – с. Оксине – р. Печора, пр. Городецкий Шар – г. Нарьян-Мар – р. Печора, рук. Б. Печора – с. Осколково и (схема *c*) р. Печора – с. Оксине – р. Печора, рук. Мал. Печора – Андег.

Погодичный анализ заторов на участке (схема *a*) Усть-Цильма – Оксине за период с 1978 по 2019 г. (рис. 2. 12, *a–c*: *a* – участок 425–332 км от устья, *b* – 337–239 км от устья, *c* – 240–141 км от устья), выявил, что общая повторяемость заторов льда на рассматриваемом участке составляет 67 %. Средняя протяженность тела затора льда, от головы до хвоста составляет 25 км, максимальная 66 км, минимальная 4 км. Наибольшая повторяемость наблюдалась в период с 1978 по 1987 г. (90 %), наименьшая – с 1998 по 2010 г. (~30 %),

Для схемы *b* места образования заторов меняются от года к году. Как правило, заторы формируются вблизи островов Средний, Кермундей, Эйхрев, Кисличный, Дюгайский. Общая повторяемость заторов льда на участке от с. Оксине до с. Осколково составляет 60 %. Средняя протяженность тела затора льда, от головы до хвоста составляет 19 км, максимальная 33 км, минимальная 12 км. Часто указанная протяженность относится не к единому телу затора, а к цепочкам небольших скоплений.

Анализ параметров заторов льда за многолетний период, сформировавшихся на участке р. Печора – с. Оксине – р. Печора, рук. Мал. Печора – Андег, (схема *c*) выявил, что для данного участка повторяемость заторов составляет 37 %. Места формирования заторов также меняются от года к году. Период существования заторов на рассматриваемом участке составляет 1–2 дня, чаще всего заторы формируются при подвижках.

Средняя протяженность тела затора льда, от головы до хвоста составляет 19 км, максимальная – 33 км, минимальная – 12 км. Указанные размеры достаточно велики, что лишний раз подтверждает, что заторы льда на рассматриваемом участке не единичны, а представляют собой цепочку небольших скоплений.

Характер формирования весенних ледовых явлений, их последовательность, а также соотношения сроков их наступления по рукавам и протокам является одним из важнейших факторов формирования заторов льда. Основным фактором формирования заторов льда является наличие препятствий для свободного продвижения льдин, в случае с устьевым участком р. Печоры – это не только острова, сужения русла, но и положение кромки сплошного или несплошного ледостава, наличие подвижек льда, при которых происходит динамическое утолщение ледяных образований. Разница во времени добегания волны ледохода между с. Оксино и протоками является немаловажной характеристикой поскольку позволяет оценить, насколько свободным будет продвижение больших масс льда в ледоходе, поступившего с вышеуказанных участков.

Анализ погодических схем на участке от с. Оксино до устьевого створа позволил выделить четыре условных типа развития ледохода в зависимости от ледовой обстановки по проткам:

1. Вскрытие Большой Печоры начинается раньше, чем Малой Печоры. Пока по протоке Большая Печора развиваются подвижки и ледоход, на Малой Печоре сохраняются закраины, ниже с. Оксино наблюдается густой ледоход. В такие годы формирование заторов происходит только в протоке Большая Печора, Малая Печора вскрывается без заторов или с кратковременными остановками.

2. Вскрытие Малой и Большой Печоры начинается одновременно, после формирования закраин и подвижек. Если голова затора устанавливается в Большой Печоре выше Андегского узла, то ледоход по Малой Печоре проходит спокойно, без образования мощных заторов (1991, 2011, 2012, 2015 гг.). Если голова затора в Большой Печоре устанавливается ниже Андегского узла, то возможно перераспределение льда из Большой Печоры в Малую и образование мощного затора по обоим протокам (1984, 1998, 1999, 2010 гг.). Это наиболее опасный сценарий развития ледовой обстановки.

3. Вскрытие Малой Печоры начинается раньше Большой Печоры, как правило это период не превышает 1–2 сут., которых достаточно для формирования заторов льда выше д. Андег. Формирование заторов на Б. Печоре равновероятно.

4. Ледоход останавливается в заторе ниже с. Оксино. Если разница между сроками образования такого затора и сроками начала ледохода по Большой и Малой Печоре превышает 5 сут., то обе протоки вскрываются без образования мощных заторов, с кратковременными остановками ледохода (1985, 1986, 2015 гг.).

Данная типизация достаточно условна, но при этом позволяет понять алгоритм формирования заторов льда на рассматриваемом участке при разработке мер по предотвращению негативных последствий от заторов льда.

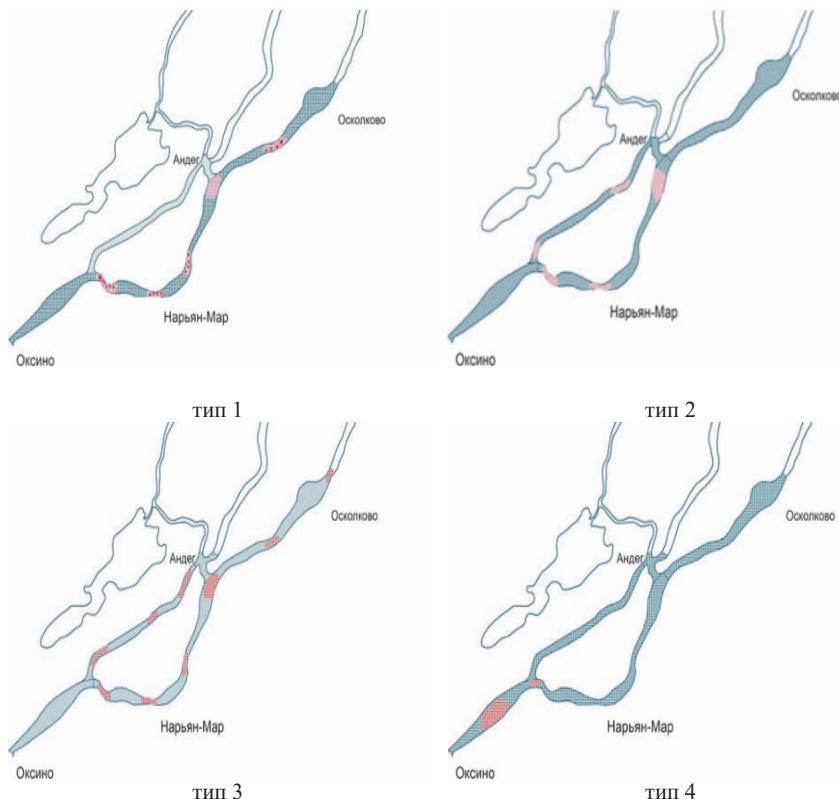


Рис. 1. Типизация развития ледохода в зависимости от ледовой обстановки по протокам, участок р. Нижняя Печора

То есть для нижнего течения р. Печоры мероприятия по разрушению образовавшихся заторов возможны только в случае свободного ото льда протяженного участка ниже по течению. Цепочки заторов необходимо разрушать от нижнего затора к верхнему. Снижение уровней воды возможно и без прорыва затора. Отток воды из верхнего бьефа затора может быть обеспечен по каналу в теле затора или в обход его. При разрушении заторов в рукавах дельты следует учитывать перераспределение стока воды по рукавам, свободным ото льда.

Согласно [9] система противозаторных мероприятий включает:

- прогнозирование места образования затора, его мощности и характеристик возможного затопления территории;
- предупредительные меры по снижению стока льда и недопущении образования затора;
- непосредственно борьба с уже образовавшимся затором и заторными подъемами уровней воды.

В основе стратегии борьбы с заторами в приоритете должны быть заложены предупредительные мероприятия, решение об их составе принимается на основании прогноза характеристик затора [15]. Прогнозы заторных уровней воды составляются на основе эмпирических зависимостей, с использованием логистической регрессии или методов машинного обучения (искусственных нейронных сетей, деревьев решений и т. д.) [17]. Состав предикторов определяется условиями формирования заторов на каждом конкретном участке реки. Для рек, замерзающих по зажорному типу, используют максимальный уровень воды в начале ледостава, для остальных участков – расходы или уровни воды, а также толщину льда перед началом весеннего ледохода [1; 18].

Планирование противозаторных мероприятий для нижнего течения р. Печоры должно осуществляться в тесном взаимодействии с вышеуказанным участком р. Печоры. Для рек, текущих с юга на север, обеспечить беззаторное прохождение весеннего ледохода невозможно, но не каждый затор представляет опасность для населения и хозяйства и при организации работ по борьбе с заторами необходимо оценить возможность затопления населенных пунктов. Ускорение ледохода и искусственное разрушение заторов на вышеуказанных участках может привести к катастрофическим последствиям (формированию мощных заторов и затоплению населенных пунктов на территории Ненецкого автономного округа).

Для нижнего течения р. Печоры мероприятия по разрушению образовавшихся заторов возможны только в случае свободного от льда протяженного участка ниже по течению. Цепочки заторов необходимо разрушать от нижнего затора к верхнему. Снижение уровней воды возможно и без прорыва затора. Отток воды из верхнего бьефа затора может быть обеспечен по каналу в теле затора или в обход его. При разрушении заторов в рукавах дельты следует учитывать перераспределение стока воды по рукавам, свободным от льда.

Учитывая невозможность беззаторного прохождения весеннего ледохода на исследуемом участке эффективным может быть не ускорение, а задержка вскрытия рек. На устьевом участке при проведении противозаторных мероприятий следует учитывать позднее очищение от льда Печорской губы.

Для повышения эффективности проводимых мероприятий в нижнем течении р. Печоры необходимо усилить мониторинг ледовой обстановки в зимний период, дополнив программу наблюдений регулярными наземными обследованиями и подробными ледомерными съемками. Совместное использование карт ледовой обстановки, составленных по результатам авиаобследований, спутниковой информации, а также материалов гидрологических постов и ледомерных съемок позволят оперативно уточнять прогноз сроков и уровней весеннего ледохода.

Список литературы

1. Бузин В. А. Зажоры и заторы льда на реках России. СПб.:ГГИ, 2015. 240 с.
2. Банщикова Л. С. Выделение зон затопления при заторных наводнениях (на примере р. Печоры) // Сборник работ по гидрологии. 2011. № 28. С. 4–13.
3. Банщикова Л. С. Мониторинг процесса заторообразования на реках по пространственно-временным графикам уровня воды // Метеорология и гидрология. 2008. № 9. С. 87–93

4. Ежегодные данные о режиме и качестве вод рек. Гидрологические ежегодники 1950–1979 г. Т. 0. Бассейны Белого и Баренцева морей Бассейны рр. Вычегды, Печоры и рек к востоку до границы бассейнов Баренцева и Карского морей. Вып. 4,8,9.
5. Ежегодные данные о режиме и качестве вод рек. Гидрологические ежегодники. 1981–2019.
- Т. 9: Бассейн Печоры
6. Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. 1978–2016. Т. 3: Баренцево море. Ч. 2. Устье р. Печоры.
7. Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. 1. Л. : Гидрометеоиздат, 1976. 260 с.
8. Лупачев Ю. В. Особенности динамики весенних ледоходов и заторов льда в устьях Северной Двины и Печоры // Водные ресурсы. 2001. Т. 28, № 2. С. 245–249.
9. Методические указания по борьбе с заторами и зажорами льда. М. : Энергия, 1970. 158 с.
10. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Печора. М. ; Иваново : ПресСто, 2021. 152 с.
11. Сумачев А. Э., Баникова Л. С. Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода //Гидрометеорология и экология. 2020. № 61. С. 446–459.
12. Сумачев А. Э., Баникова Л. С., Агафонова С. А. Анализ многолетней изменчивости температуры воздуха холодного периода в низовьях Печоры как фактора ледового режима //Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. 2021. С. 468–473.
13. О защите населения и территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : федер. закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ // СПС «Гарант».
14. О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций : постановление Правительства РФ от 30.12.2003 № 794 // СПС «Гарант».
15. Шаталина И. Н., Трегуб Г. А. Ледовые проблемы строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений. СПб. : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2013. 452 с.
16. Ice jam formation, breakup and prediction methods based on hydroclimatic data using artificial intelligence: a review / Madaeni F., Lhissou R., Chokmani K., Raymond S., Gauthier Y. // Cold Regions Science and Technology. 2020. Vol. 174. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.103032>
17. Magritsky D., Lebedeva S., Skripnik E. Hydrological hazards at mouths of the northern dvina and the pechora rivers, russian federation // Natural Hazards. 2017. Vol. 88, N 1. P. 149–170.
18. White K. D. Review of prediction methods for breakup ice jams // Canadian Journal of Civil Engineering, 2003. Vol. 30, Is. 1. P. 89–100. <https://doi.org/10.1139/L02-047>

УДК 551.515.6+551.510.522

О субмезомасштабных структурах в пограничном слое атмосферы и их связи с экстремальными событиями

Н. В. Вазаева (vazaevanv@ifaran.ru)^{1,2}, О. Г. Чхетиани (ochkheti@gmail.com)¹,
В. Ф. Крамар (vkramar@list.ru)¹

¹Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва

²МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва

Аннотация. Субмезомасштабные вихревые структуры давно регистрируются в численных моделях, но детальный их анализ на основе достаточно уверенной экспериментальной регистрации с большим разрешением до сих пор не проводился. Стрики важны для разработки новых схем параметризаций, при описании обменных процессов, в том числе экстремальных явлений над территорией России. Актуальным является подробное исследование характеристик таких структур. Одному из характерных и показательных анализов – спектральному – и посвящено настоящее исследование.

Ключевые слова: субмезомасштабные когерентные структуры, турбулентность, спектры, спиральность, данные наблюдений.

Введение

В атмосферном пограничном слое (АПС) постоянно существуют субмезомасштабные вихревые структуры (стрики), которые представляют собой вытянутые в направлении средней скорости ветра полосы низкой и высокой скорости движения. В некоторой литературе эти структуры также называются крупномасштабной турбулентностью. В стриках происходит до 25 % турбулентной дисси-пации энергии. Поэтому сложно переоценить важность вклада таких когерентных структур в обменные процессы, а также их влияние на экстремальные события. Изучение субмезомасштабных вихревых структур, с пространственным масштабом от десятков до сотен метров и временным масштабом от десятков секунд до минут, представляет большой интерес. Возникновение стриков связывают с развитием оптимальных немодальных возмущений в стратифицированном экмановском слое, испытывающих интенсивный алгебраический рост за конечные промежутки времени [2].

На основе экспериментальных данных, полученных в ходе организованных ИФА РАН экспедиций на аридных территориях юга России, был сделан вывод о характере интенсификации эмиссии пыли с подстилающей поверхности: интенсификация связана с увеличением вертикальных составляющих скорости, а также градиента давления, приводящего к «расшатыванию» частиц верхнего слоя, частичной турбулизации приземного слоя и отрыву большого количества аэрозоля. В результатах численного моделирования этот вывод хорошо визуализируется увеличением массовой концентрации частиц пыли в области расчета при моделировании с учетом действия субмезомасштабных вихревых структур: такие структуры необходимо учитывать в схемах параметризаций АПС.

Моделирование

Описанная валиковая циркуляция оказывает существенное влияние на процессы захвата и подъема частиц: валики способны поднять пыль преимущественно под структурами. Направление дальнейшего переноса пыли в значительной степени определяется углом отклонения оси структур от геострофического ветра. Некоторое пространственное отклонение области подъема облака пыли может быть вызвано нелинейными эффектами в АПС, в частности, асимметрией скорости вихрей, расхождением размеров и периодов соседних валиков, наличием в АПС вторичной циркуляции различных пространственных масштабов.

Для моделирования выбрана модель WRF-ARW, WRF-LES. При расчетах использовались вложенные сетки. Вся расчетная область 300 на 225 км рассчитывается на крупной сетке 210×138 узлов по горизонтали с шагом 1620 м. Вложенная область детализированного расчета 75 на 50 км считается на сетке 556×355 узлов с шагом 540 м, вложенная область (для последующего LES-моделирования) 75 на 50 км – на сетке 742×607 узлов по горизонтали с шагом 180 м. По вертикали все области имеют 35 уровней до высоты 5000 м со сгущением в пограничном слое. В качестве начальных и граничных данных использованы поля реанализа NCAR. Расчет начат за сутки до изучаемого момента. Одному шагу расчета по времени для крупной области соответствует 3 шага расчета

по времени для вложенной области. Временной интервал между начальными полями метеопараметров глобального операционного анализа GFS на сетке $0,5 \times 0,5$ равен 6 ч. Координаты центра расчетной области соответствуют $45,33^\circ$ с. ш. и $46,04^\circ$ в. д. Отметим, что мезомасштабная циркуляция начинает неплохо воспроизводиться на сетках с горизонтальным масштабом не более 500 метров. Для регистрации субмезомасштабных структур необходима большая детализация сетки. В этом случае на поперечный размер структуры приходится 5–10 сеточных узлов, что позволяет воспроизводить их основные характеристики. Более детальное воспроизведение подобных движений в пограничном слое требует разрешения на порядок больше – 50 м по горизонтали и 10 м по вертикали. В настоящее время это возможно сделать в рамках WRF-LES модели. В этой модели увеличение пространственного разрешения по горизонтальным координатам является более выгодным, чем увеличение вертикального пространственного разрешения. В настоящем случае для мезомасштабных когерентных структур определено оптимальное пространственное разрешение примерно 100–180 м. Интенсификация подъема аэрозоля показана для таких структур на рис. 1, где максимум эмиссии приходится на область под когерентными структурами. Субмезомасштабные структуры подобны мезомасштабным, их воздействие на подъем аэрозоля аналогичен.

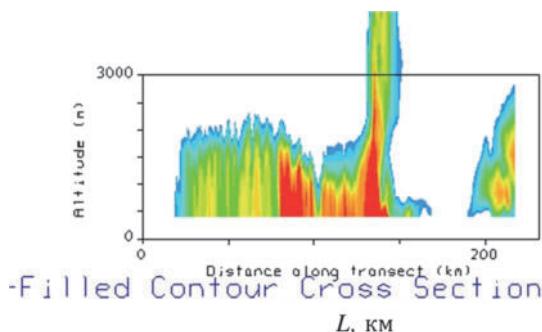


Рис. 1. Моделирование частного случая. Массовая концентрация аэрозоля для частиц с медианным размером до $0,5 \mu\text{м}$ в поперечном сечении, перпендикулярной оси роллов. Модель WRF-ARW V.3.9.1 (WRF-LES, WRF-Chem), 8 UTC. От синего до красного цвета – увеличение массового содержания аэрозоля в слое от 10^{-12} до $0,5 \text{ мкг}/\text{кг}$. Chem-модуль: GOCART, в модуле используется только моделирование пыли

Для параметризации пограничного слоя использована схема Меллора-Ямады-Яничча, промежуточная Shin-Hong scheme и LES параметризация; для параметризации приземного слоя используется теория Монина-Обухова; Rapid Radiative Transfer Model и Goddard shortwave (Two-stream multi-band scheme) выбраны для параметризации длинноволнового и коротковолнового излучения; для параметризации турбулентности принята схема полной диффузии с использова-

нием трехмерного метода Смагоринского и для LES-моделирования – схема простой диффузии с использованием двухмерного метода (коэффициент K определяется только с использованием горизонтальной деформации); Morrison double-Momentum scheme применена для параметризации микрофизики; Unified Noah land-surface model – для параметризации параметров земной поверхности.

Эксперимент

Основные результаты настоящего исследования лежат в области обработки данных наблюдений.

BPMC – Высокого Разрешения Мини Содар – с высокой достоверностью и хорошей точностью данных регистрирует стрики. Данные достоверны на высотах 2–45 м с разрешением 1 м по высоте и 1 с по времени. Основной фиксируемый крупный временной масштаб стриков 5–10 мин, соответствующее пространственное разрешение 300–500 м, определяемое через среднюю скорость ветра, переносящего структуры. Результаты измерения представляются в виде эхограмм. Верхняя панель – интенсивность эхо-сигнала в произвольных единицах, справа показана цветовая шкала в децибелах. Средняя панель – диаграмма вертикальной составляющей скорости. Нижняя панель – профили модуля горизонтальной скорости ветра и ее направления, осредненные за 30 мин. В данных измерений BPMC после осреднения четко идентифицируются субмезомасштабные когерентные структуры. Вертикальное поле скорости, плотность спиральности показаны на рис. 2, 3. Хорошо фиксируется основной крупный временной масштаб 5–7 мин для 2017 г., 6–8 мин для 2018 г., 7–10 мин для 2019 г., наблюдаемый во всех 3 компонентах поля скорости.

Наличие спиральности в АПС может быть одним из источников усиления завихренности в таких структурах.

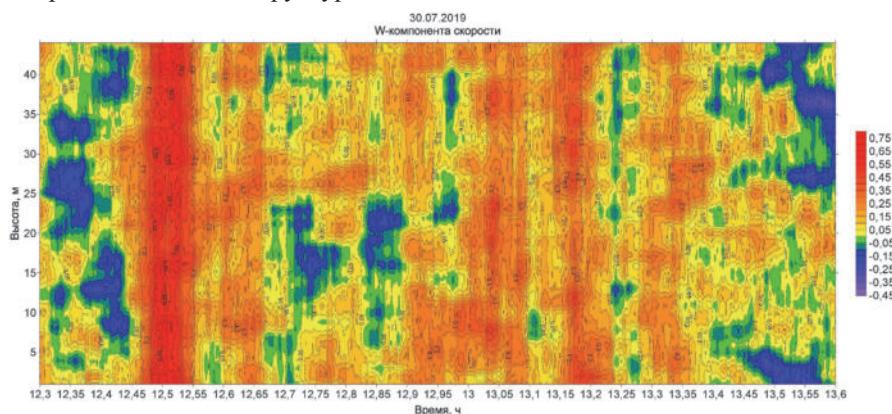
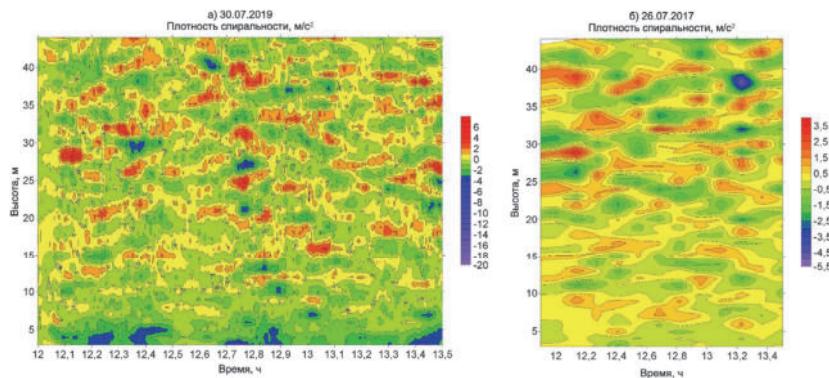


Рис. 2. Вертикальное поле скорости для часовой записи, выполненной минисодаром приземного слоя от 30 июля 2019 г. (Цимлянская научная станция (ЦНС) с 4-минутным осреднением. Масштаб структур крупнее, порядка 7–10 мин



*Рис. 3. Плотность спиральности стриков, м/с². Содарные измерения, Цимлянск,
а) 30 июля 2019 г., б) 26 июля 2017 г. Параметр осреднения – 5 мин. Плотность
спиральности в стриках по результатам проведенных измерений составляет 0,5–4 м/с²*

Характерные спектры стриков

По данным доплеровского минисодара высокого разрешения в летний период 2017–2019, 2021 гг. на Цимлянской научной станции, и по результатам измерения циркулиметра на Звенигородской научной станции в 2004 г., используя данные скорости с мачты в Обнинске, построены спектры вертикальной и горизонтальной компонент скоростей, а также спектры спиральности. В области малых частот спектр имеет наклон, близкий к -1 , при увеличении частоты спектр имеет наклон, близкий к $-5/3$. На наличие стриков указывают данные о флюктуациях скорости и температуры в АПС, которые демонстрируют спектральные зависимости с наклоном, близким к k^{-1} [4], и именно с этими структурами связаны наблюдаемые в дни измерений энергетические спектры с показателем степени -1 . Физические механизмы укрепления и поддержания таких структур обычно связаны со сдвиговыми неустойчивостями [3] или с их конвективной аналогией [1], где роль температурного поля играют турбулентные напряжения Рейнольдса. Результаты приведены на рис. 4.

Заключение

Когерентные, в частности, субмезомасштабные, структуры вносят больший вклад в обменные процессы АПС. Исследование механизмов обменных процессов, действующих при различных метеорологических условиях, необходимо для увеличения точности моделирования АПС, в том числе, экстремальных событий. Рост количества экстремальных событий в атмосфере вызывает увеличение спроса на системы мониторинга и прогнозирования переноса загрязнений, поэтому в настоящее время актуальным является разработка параметризаций, в том числе, стриков в АПС.

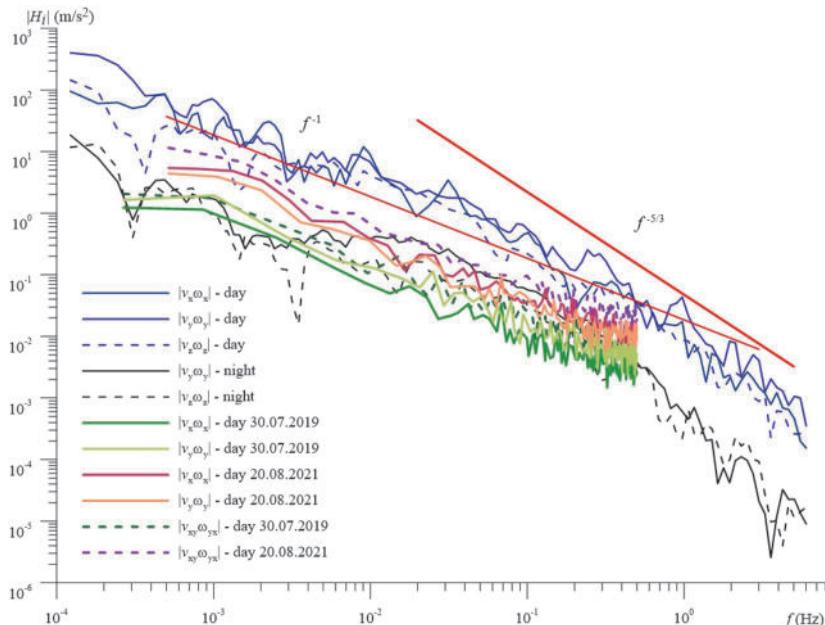


Рис. 4. Спектры спиральности по данным доплеровского минисодара высокого разрешения в летний период 2017–2019, 2021 гг. на Цимлянской научной станции, и по результатам измерения циркулиметра на Звенигородской научной станции в 2004 г.

По результатам данной работы сделаны выводы:

1. ВРМС фиксирует стрики с основным крупным временным масштабом 5–10 мин. и соответствующим пространственным масштабом 300–500 м, определяемым через среднюю скорость ветра, переносящего структуры.
2. Плотность спиральности в стриках по результатам проведенных измерений составляет 0,5–4 м/с².
3. В области малых частот спектр имеет наклон, близкий к –1, при увеличении частоты спектр имеет наклон, близкий к –5/3. Наклон –1 связан с развитием стриков в АПС.

Исследования выполнены при поддержке РНФ (№ 22-77-00098).

Список литературы

1. Никитин Н. В., Чернышенко С. М. О природе организованных структур в пристенных турбулентных течениях // Механика жидкости и газа. 1997. № 1. С. 24–30.
2. Чхетиани О. Г., Вазаева Н. В. Об алгебраических возмущениях в атмосферном пограничном слое // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, № 5. С. 62–75.
3. Drobinski P., Foster R. C. On the origin of near-surface streaks in the neutrally-stratified planetary boundary layer // Boundary-Layer Meteorology. 2003. Vol. 108. P. 247–256.
4. Kader B. A., Yaglom A. M. Spectra and correlation functions of surface layer atmospheric turbulence in unstable thermal stratification // Turbulence and Coherent Structures. Dordrecht : Springer, 1991. P. 387–412.

УДК 551.509.54+551.574.7

Комплексный алгоритм выявления пространственных зон обледенения по авиационному маршруту

М. В. Гришаев (mishagrishev@gmail.com), М. А. Волкова (mv2101@mail.ru),
В. Б. Чурсин (skriptym@mail.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Аннотация. Для обеспечения авиации информацией об обледенении по маршруту следования самолета в произвольной точке трассы и в определенный период времени разработан алгоритм и создан программный код на языке программирования Python для построения потенциальных зон обледенения по методам Годске и NCEP. В ходе работы использованы цифровая модель рельефа и модель прогноза погоды GFS. Алгоритм протестирован на трех произвольных маршрутах: Кызыл – Екатеринбург; Братск – Якутск; Томск – Норильск. Для сопоставления полученных результатов с синоптической ситуацией на авиационном маршруте использованы спутниковые снимки территорий с космического аппарата Арктика-М № 1, на которых проходили данные маршруты. Сравнение выявленных зон на основе двух методов показало, что метод Годске выявляет более фрагментированные зоны по пространству и времени, а метод NCEP прогнозирует обледенение на больших площадях по маршруту.

Ключевые слова: Обледенение, метод NCEP, метод Годске, спутник Арктика-М № 1, Python

Глобальный аeronавигационный план ИКАО, сформулированный на период до 2028 г., предусматривает разработку и применение полной автоматизации обеспечения метеорологической информацией в любой точке, на любой высоте в каждый момент времени. Для этого предполагается усовершенствование сверхкраткосрочного прогнозирования и наукастинга, использование численного прогноза, дистанционных измерений (радаров и спутников), данных частой сети наземных станций, самолетных измерений и передачи метеорологической информации с бортов самолетов [4].

Одним из наиболее опасных явлений для авиации является отложение льда на поверхности воздушного судна (ВС) во время полета. При обледенении фиксируются потеря подъемной силы, снижение скорости полета и, в некоторых случаях, полного контроля над ВС. Все это может привести к авиационным происшествиям, в том числе с человеческими жертвами [1]. Для оперативного выявления таких зон необходим алгоритм, выявляющий зоны потенциального обледенения по имеющимся данным метеопараметров, и оперативно предоставляющий информацию заинтересованным потребителям в области авиационно-метеорологического обеспечения.

Актуальность работы обусловлена тем, что во время полета самолеты подвержены влиянию различных опасных явлений, в том числе обледенения, и для предотвращения экстренных ситуаций нужно заранее знать метеорологическую обстановку в любой точке полета и на любой высоте.

Цель работы заключается в разработке алгоритма и программного кода выбора данных для составления вертикального разреза с потенциальными зонами обледенения по авиационному маршруту.

В оперативной прогностической практике возможность возникновения обледенения в основном определяется по методу К. Годске [3], в численных схемах прогноза реализуется алгоритм прогноза обледенения, разработанный в Национальных центрах США прогнозирования состояния окружающей среды (NCEP) [3; 6].

В случае метода Годске знание вертикальных профилей температуры и температуры точки росы, которая характеризует влажность воздуха, позволяет рассчитать пространственные зоны вероятного обледенения воздушных судов по формуле (1)

$$T(z) \leq -8\{T(z) - Td(z)\} \quad (1)$$

где $T(z)$ – температура воздуха на высоте z , $Td(z)$ – температура точки росы на высоте z . Величина $-8\{T(z) - Td(z)\}$ – температура насыщения по отношению ко льду.

Для метода, предложенного в NCEP, пространственные зоны вероятного обледенения воздушных судов определяются с помощью неравенств (2)

$$\begin{aligned} -16^{\circ}\text{C} &\leq T(z) \leq 0^{\circ}\text{C}, \\ Rh(z) &\geq 63\%, \end{aligned} \quad (2)$$

где $RH(z)$ – относительная влажность на высоте z .

Таким образом, формулы (1–2) являются основой при определении пространственных зон возможного обледенения как в чисто капельных переохлажденных облаках и в зоне переохлажденного дождя, мокрого снега, мороси и т. п. под облаками, так и при непосредственной сублимации водяного пара.

Методы Годске и NCEP ранее использовались при разработке и апробации алгоритма прогноза обледенения с заблаговременностью 24 ч в районе аэропорта Томск на основе данных мезомасштабного гидродинамического моделирования [7; 9].

В данной работе для расчета потенциальных зон обледенения по маршруту использовались данные цифровой модели рельефа (digital elevation model (DEM)) и модели прогноза погоды Национального центра прогнозирования окружающей среды (NCEP). Gt 30 – файл, содержащий цифровую модель рельефа с шагом сетки по горизонтали 30 угловых секунд, что приблизительно составляет 1 км. Система горизонтальных координат состоит из десятичных градусов широты и долготы, находится данная система в WGS84. Распределение по высоте представляют в метрах над уровнем моря. GFS (global forecast system) – это модель прогноза погоды, которая рассчитывает данные для множества атмосферных и почвенных параметров, таких как: температуры, ветер, осадки, влажность почвы, и концентрация атмосферного озона. GFS объединяет четыре отдельные модели (атмосфера, океан, почва, ледники), которые работают вместе для точного отображения погодных условий. Данная модель имеет горизонтальное разрешение 28 км между точками сетки. Временное разрешение данной модели охватывает прогнозы на срок до 16 дней. Горизонтальное разрешение уменьшается до 70 км для прогнозов на срок от одной до двух недель [5; 8].

Снимки облачности по маршрутам были получены с космического аппарата Артика-М № 1 17.04.2022 в срок 03:00 СГВ. Данный спутник обеспечивает получение изображений облачного слоя Земли. Снимки были сделаны в ИК диапазоне, а именно через температурный канал (9 канал, 10,7 мкм) [2].

Алгоритм построения зоны обледенения состоит из шести блоков.

В первом блоке загружаются библиотеки языка Python и метеорологические данные, с которыми предстоит работа.

Во втором блоке вводятся значения широт и долгот точек вылета и прилета, с округлением до одного знака после запятой. После этого вычисляются значения всех долгот по маршруту с шагом 0,1°. Затем рассчитываем расстояние между конечной и начальной точкой вылета по широте и долготе. Через тригонометрические функции определяется угол между широтой и траекторией полета.

В третьем блоке по координатам из модели GT30 отображается рельеф местности по необходимому маршруту. Для получения и дальнейшего использования в расчетах метеорологических характеристик из модели GFS задаются широты и долготы, через которые проходит выбранный маршрут.

В четвертом блоке задана функция расчета точки росы, которая необходима для непосредственного расчета обледенения. Дальше производится непосредственно расчет потенциального обледенения 1. Расчет обледенения по методу Годске. 2. Расчет обледенения по методу NCEP. Если выполняются условия возникновения обледенения выводится число – 1, а если обледенения нет – 0.

В пятом блоке созданы массивы для вывода результатов (метеорологические характеристики, высота и наличие обледенения). По заданным координатам в каждой точке выводятся данные по рельефу, а также метеорологические параметры (температура, влажность). Здесь же производится запись полученных результатов в массивы, которые будут использоваться для визуализации.

В шестом блоке полученные результаты визуализируются с помощью графика, отражающего изменения температуры с высотой и по долготам, а также рельеф и результаты прогноза обледенения по методам Годске и NCEP.

По оси Y отложены высоты над уровнем моря в метрах, по X – расстояние в километрах. Оранжевым цветом отображается рельеф, который располагается на данном маршруте. Распределение температуры показано градиентом цветов, от 0 до –72 °C, изотермы визуализированы белой пунктирной линией. Обледенение отображено на графике: желтый цвет – обледенение возможно, фиолетовый – обледенения нет.

Для примера рассмотрим маршрут Кызыл – Екатеринбург. Из рис. 1, построенного по данным КА Артика–М№ 1 видно, что 17 апреля 2022 трасса пролегала через зону облачности, которая располагалась в Алтайском крае, небольшая часть облачности заходит на территорию Новосибирской области, в которой расположена Барабинская низменность.

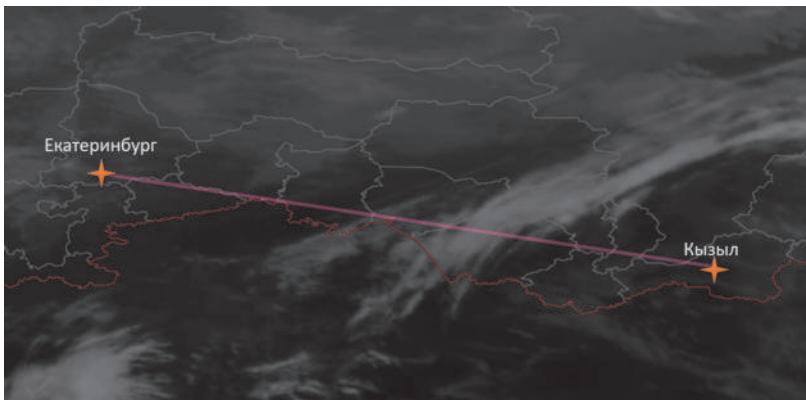


Рис. 1. Маршрут Кызыл – Екатеринбург (17 апреля 2022 г.)

Пространственное распределение температуры на маршруте Кызыл – Екатеринбург отражено на рис. 2, из которого видно изменение температуры вдоль маршрута, а также по высоте. В нижнем 2-километровом слое температура вдоль маршрута составила от 0 °C (район Урала) до +18 °C (Республика Тыва). Наибольшие значения температуры наблюдались на предгорной территории (80–85° в. д.). По вертикали температуры убывают равномерно, но стоит отметить, что изобары над горными районами приподняты сильнее, чем над равнинной местностью. Очаг минимальных температур –63 °C наблюдается над горным районом Республики Тыва на высоте от 11 до 12 км.

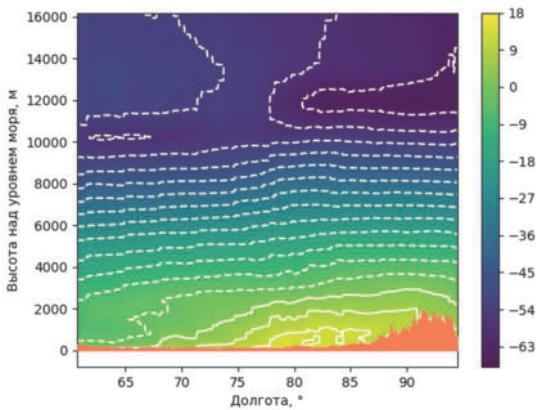


Рис. 2. Вертикальный разрез температуры (°C) воздуха по маршруту следования Кызыл – Екатеринбург (17 апреля 2022)

На рис. 3 и 4 представлены зоны возможного обледенения, рассчитанные по методу К. Годске и NCEP.

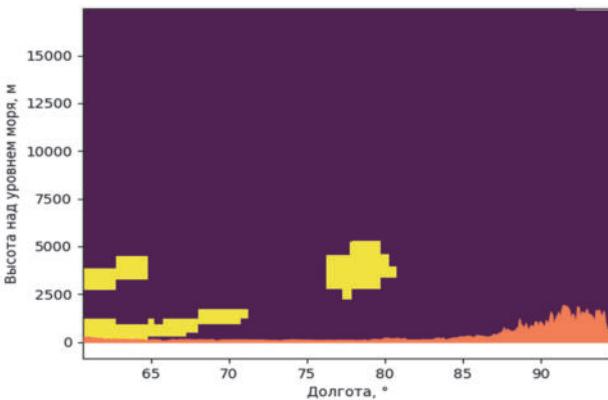


Рис. 3. Зоны возможного обледенения (метод NCEP) по маршруту следования
Кызыл – Екатеринбург (17 апреля 2022)

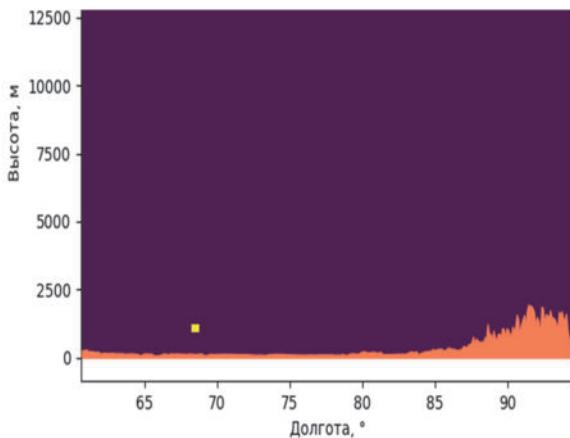


Рис. 4. Зоны возможного обледенения (метод Годске) по маршруту следования
Кызыл – Екатеринбург (17 апреля 2022)

По методу NCEP выявлены три зоны возможного обледенения, первые две находятся в районе Екатеринбурга. Одна из них располагается с 60 по 72° в. д., от поверхности Земли и до высоты 2 км. Вторая зона расположена с 60 по 64° в. д. на высоте от 2,5 до 4 км. Третья возможная зона обледенения находится на середине маршрута, а именно с 77 по 82° в. д. на высоте от 2,5 до 5 км.

По методу К. Годске выявлена одна незначительная зона на 68 °в. д. в диапазоне высот от 1,2 до 1,5 км.

По итогам проведенной работы можно сформулировать следующие выводы.

Разработан алгоритм и создан программный код на языке программирования Python для построения потенциальных зон обледенения по авиационным маршрутам/трассам.

В качестве демонстрации работы алгоритма были рассмотрены три произвольных маршрута, по которым были визуализированы полученные результаты, а именно пространственное распределение температуры по маршруту и возможные зоны обледенения по методам К. Годске и NCEP.

Сравнение выявленных зон на основе методов К. Годске и NCEP показало, что алгоритм К. Годске выявляет более фрагментированные зоны.

Список литературы

1. Никитин Г. А., Баканов Е. А. Основы авиации : учеб. для вузов гражд. авиации. Л. : Гидрометеоиздат, 1984. 261 с.
2. ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» сибирский центр». URL: <https://rcpod.ru/operativnaya-informatsiya> (дата обращения: 17.04.2022)
3. Шакина Н. П., Иванова А. Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М. : Триада, 2016. 312 с.
4. Global Air Navigation Plan 2013–2028. (2013). URL: https://www.icao.int/WACAF/Documents/edocs/9750_cons_en.pdf (дата обращения: 10.10.2022)
5. National Centers for Environmental Information: Global Forecast System. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast> (дата обращения: 12.04.2022)
6. Schultz P., Politovich M. K. Toward the improvement of aircraft icing forecasts for the continental United States // Weather and Forecasting. 1992. Vol. 7, N 9. P. 491–500.
7. Forecast of Extreme Weather Conditions that Promote Aircraft Icing During Take-off or Landing / Sitnikov G. I., Starchenko A. V., Terenteva M. V., Barashkova N. K., Volkova M. A., Kuzhevskaya I. V., Kizhner L. I. // Proc. of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2015. Vol. 9680. P. 1–7.
8. USGS EROS Archive – Digital Elevation – Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30), URL: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-global-30-arc-second-elevation-gtopo30?qt-science_center_objects=0#overview (дата обращения: 12.04.2022).
9. Forecast of icing zones using possibilities of hydrodynamic simulation for the atmospheric boundary layer / Volkova M. A., Starchenko A. V., Kuzhevskaya I. V., Bart A. A., Kizhner L. I., Barashkova N. K. // Proc. SPIE. 2016. Vol. 10035, 1003567. <https://doi.org/10.1117/12.2249019>

УДК 551.583

Циркуляционные условия формирования опасных явлений на территории Обь-Иртышского междуречья

Т. В. Дегтярева (degyareva.tatiana20@gmail.com),

М. А. Волкова (mv2101@mail.ru)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Аннотация. В работе использованы данные об опасных явлениях за 2018–2019 гг. с двадцати станций Новосибирской и Томской областей, переданных сообщениями WAREP. Обозначено, что на территории Обь-Иртышского междуречья наблюдалось 32 дня с опасными явлениями: очень сильный ветер, шквал, сильный мороз, аномально-холодная погода, туман сильный, сильное отложение мокрого снега, очень сильный дождь (дождь, ливневый дождь), сильный ливень, крупный град. Рассмотрена повторяемость опасных явлений в годовом и суточном ходе. Проведена оценка циркуляционных условий на территории Обь-Иртышского междуречья для каждого случая возникновения опасного явления. Температурные явления холодного периода наблюдались при антициклональном барическом поле; явления, связанные с сильными осадками и ветром – при прохождении холодных фронтов.

Ключевые слова: сильный ветер, сильный мороз, крупный град, Большое Васюганское Болото.

На фоне происходящих изменений климата происходит увеличение повторяемости опасных явлений (ОЯ) [3]. Так как опасные явления представляют угрозу для жизнедеятельности человека и для разных отраслей экономики, то необходимо своевременно отслеживать появление опасных явлений и вовремя проводить информирование о возможной опасности, а также изучать природу возникновения опасных явлений.

Также, стоит отметить, что на территории Обь-Иртышского междуречья находится уникальный природный объект – Большое Васюганское Болото (БВБ), который оказывает большое влияние на климатические условия рассматриваемого района [1; 2].

В работе использовались сообщения об опасных явлениях, кодируемых WAREP за 2018–2019 гг. с двадцати станций Новосибирской и Томской областей: Чулым, Крещенка, Барабинск, Убинское, Парабель, Бакчар, Молчаново, Кыштовка, Новый Васюган, Колпашево, Первомайское, Старица, Колывань, Карагасок, Пудино, Северное, Майск, Кожевниково, Средний Васюган, Коченево (рис. 1).

Был проведен критический анализ данных на соответствие критериям опасных явлений, для исключения некорректных записей.

Критерии ОЯ устанавливаются либо по вероятности возникновения явлений, либо «директивно» с учетом результатов анализа данных гидрометеорологических наблюдений за многолетний период. При этом критерии ОЯ принимаются едиными для всей территории страны либо устанавливаются дифференцированно для различных физико-географических и природно-климатических районов. Перечень опасных гидрометеорологических явлений, их определения и критерии в соответствии с Руководящим документом Росгидромета РД 52.04.563-2002 (Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения).

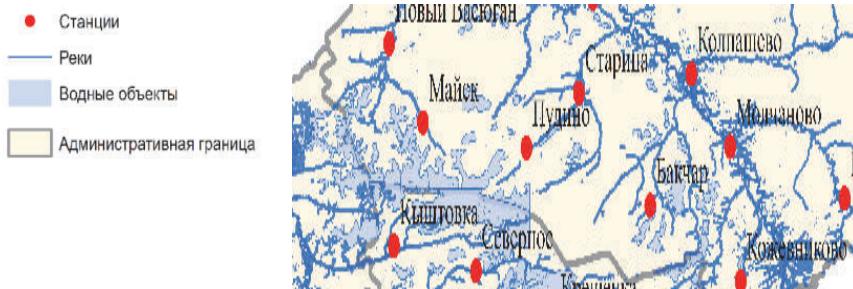


Рис. 1. Расположение метеорологических станций на территории Новосибирской и Томской областей

За рассматриваемый период (2018–2019 гг.) на территории Обь-Иртышского междуречья наблюдались такие опасные явления, как: очень сильный ветер, шквал, сильный мороз, аномально-холодная погода, туман сильный, сильное отложение мокрого снега, очень сильный дождь (дождь, ливневый дождь), сильный ливень, крупный град. Всего наблюдалось 32 дня с опасными явлениями за 2018–2019 гг., что составляет 4 % от суммы всех дней.

ОЯ «Сильный мороз» наблюдалось с декабря по февраль, всего было отмечено 13 дней за 2 года. Наибольшая повторяемость возникновения этого ОЯ была в феврале, и составила 38 %. Данное ОЯ отмечалось на таких станциях, как Старица, Средний Васюган, Каргасок, Колпашево, Крещенка, Первомайское, Кожевниково, Парабель, Колывань, Новый Васюган, Пудино, Северное и Майск. Аномально-холодная погода была отмечена 26 декабря 2018 г. на станции Колпашево и 27 декабря 2018 г. на станции Парабель.

Анализ циркуляционных условий показал, что явления «сильный мороз» и «аномально холодная погода» на данной территории обусловлены с влиянием антициклональной деятельности (пример синоптической обстановки ОЯ Сильный мороз приведен на рис. 2).

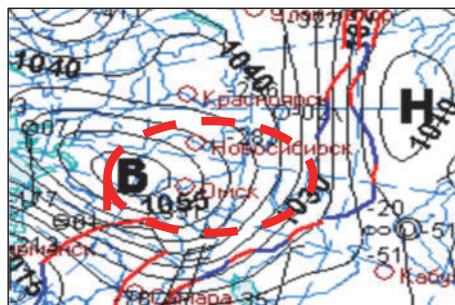


Рис. 2. Фрагмент синоптической карты за 23 января 2018 г.

Очень сильный ветер наблюдался в январе, марте, июне, августе, октябре и ноябре. Наибольшая вероятность возникновения этого ОЯ была в октябре и составила 30 %. Очень сильный ветер наблюдался всего 7 дней за 2 года на станциях Чулым, Крещенка, Барабинск, Убинское, Парабель, Бакчар и Молчаново. Скорости ветра в некоторые даты не во всех случаях достигали критических значений.

Шквал в период 2018–2019 г был зарегистрирован 2 раза: 29 июня 2018 г на станции Молчаново и 8 августа 2018 г на ст. Новый Васюган.

Шквал и очень сильный ветер наблюдался в рассматриваемой области, когда территория находилась преимущественно в области холодных фронтов (рис. 3).

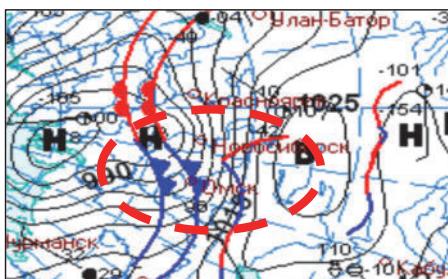


Рис. 3. Фрагмент синоптической карты за 29 октября 2019 г.

Сильный туман в районе Обь-Иртышского междуречья был зарегистрирован при прохождении теплого фронта. Данное ОЯ наблюдалось всего 1 раз за 2 года – 4 августа 2019 г. на ст. Средний Васюган.

Явление «Сильное отложение мокрого снега» было зарегистрировано, когда данная территория находилась под влиянием теплого фронта, в барической ложбине. Наблюдалось всего 1 раз за 2 года – 2 мая 2018 г.

Очень сильный дождь (дождь, ливневый дождь) связан с циклональной деятельностью на данной территории. Данное ОЯ наблюдалось 2 дня за 2 года 26 и 27 августа 2018 г на ст. Каргасок.

Сильный ливень на территории Обь-Иртышского междуречья был зарегистрирован при малоградиентном барическом поле (рис. 4). Данное ОЯ наблюдалось 3 дня за 2 года (10 июня 2018 г, 1 июля 2018 г, 13 июня 2019 г) на станциях Колывань, Бакчар, Коченево. Наибольшая вероятность возникновения ливня наблюдалось в июне и составила 67 %. Наибольшая повторяемость ветра в суточном ходу наблюдалось в часы с 6:00 до 9:00 ВСВ.

Опасное явление «крупный град» было отмечено, когда рассматриваемая территория находилась под влиянием холодного фронта. Данное ОЯ наблюдалось 1 день (2 августа 2019 г.) на ст. Майск.

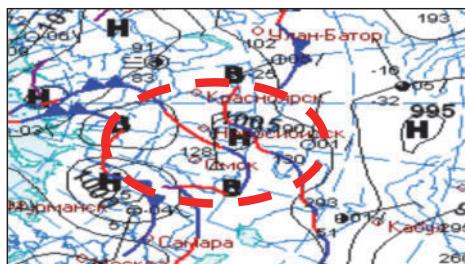


Рис. 4. Фрагмент синоптической карты за 10 июня 2018 г.

Выводы

Всего за рассматриваемый период наблюдалось 32 дня с опасными явлениями.

Явления «сильный мороз» и «аномально холодная погода» на данной территории чаще всего связаны с влиянием антициклональной деятельности.

Шквал, очень сильный ветер и очень сильный дождь (дождь, ливневый дождь) наблюдались в рассматриваемой области, когда территория находилась под влиянием циклонов, преимущественно в области холодных фронтов. Также ОЯ «крупный град» было отмечено при прохождении холодного фронта.

Сильный туман и сильное отложение мокрого снега в районе Обь-Иртышского междуречья были зарегистрированы при прохождении теплого фронта.

Сильный ливень на территории Обь-Иртышского междуречья был зарегистрирован при малоградиентном барическом поле.

Список литературы

- Горбатенко В. П., Пустовалов К. Н. Пространственная изменчивость характеристик атмосферы междууречья Обь-Иртыш в теплый период года / Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН. С. 117–119.
 - Изменение циклогенеза над западной Сибирью в 1976–2017 гг. / В. П. Горбатенко, Е. Л. Тунаев, М. А. Волкова, К. Н. Пустовалов, О. Е. Нечепуренко // Фундаментальная и прикладная климатология. 2020. Т. 2. С. 34–45.
 - Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Г. В. Алексеев [и др.]. М., 2014. С. 16.

УДК 613.166-036.88

Динамика «волн жары» на территории Санкт-Петербурга

Е. А. Дронова (edronova@rgau-msha.ru), С. М. Авдеев (avdeev@rgau-msha.ru),
И. Ф. Асауляк (iasaulyak@rgau-msha.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва

Аннотация. Указывается, что в связи с изменением климата и роста средней мировой температуры для городов стали характерны такие метеорологические явления, как «волны жары» и «волны духоты» или тропические ночи. Обозначается, что за последние 30 лет (по сравнению с базовым периодом) средняя годовая температура воздуха на территории г. Санкт-Петербурга увеличилась на 1,2 °C и, как следствие, изменилось число жарких и душных дней с 26 до 34 дней.

Ключевые слова: «волны жары», «волны духоты», изменение климата, смертность, Санкт-Петербург

Введение

Согласно заключению Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), глобальное потепление климата не вызывает сомнений и все больше находит отражение в данных различных наблюдений. По данным Всемирной метеорологической организации (ВМО), тремя самыми теплыми годами в истории наблюдений стали 2015, 2016 и 2017 [7].

Каждый год в летний период метеорологи фиксируют экстремальные высокие значения температуры воздуха, которые значительно превышают средние показатели для этого времени года. В июне текущего года во Франции и Испании установилась погода, более типичная для июля. По данным испанской национальной метеорологической службы в июне температура воздуха в некоторых районах страны в течение нескольких дней подряд превышала 40 °C. Во Франции был зарегистрирован самый теплый и самый сухой май за всю историю наблюдений. Такие погодные условия очень опасны для населения, особенно пожилых людей, для больных астмой, сердечно-сосудистыми заболеваниями. Особенно страдают жители больших городов, где мало зеленых зон. В городах формируются «острова тепла», которые и вочные часы не дают почувствовать облегчения. После 2010 г. особенно часто звучит понятие «волны жары», «волны духоты». В испанском г. Севилья периоду аномальной жары в июне 2022 г., когда температура поднялась выше 43 °C, впервые было присвоено собственное имя. «Волна жары» получила имя Zoe [4].

Специалисты, сотрудники МГЭИК под термином «волна жары» подразумевают последовательную череду аномально жарких дней – от 5–7 дней и более, когда значение среднесуточной температуры воздуха значительно выше климатической нормы в данном конкретном регионе. И эти последствия надо научится предвидеть и заранее оценивать на фоне изменения климата. Понятие «волна жары» сегодня используется не только в организациях, связанных с климатом и природой, но и в здравоохранении. В докладе рабочей группы МГЭИК за 2021 г.

указано, что одним из важнейших факторов негативных последствий изменения климата на здоровье людей, особенно в городах, являются «волны жары». И изучение их динамики, времени возникновения и продолжительности является важным вкладом в разработку мер адаптации к негативным последствиям изменения климата [1; 5].

Материалы и методы

Для анализа были взяты ряды наблюдений метеостанции Санкт-Петербург (26063) за средней суточной температурой воздуха, максимальной суточной температурой воздуха, данные об абсолютном максимуме температуры воздуха, ряд наблюдений за относительной влажностью воздуха за период с 1990 по 2019 г. Также были использованы нормы вышеописанных параметров за период с 1961 по 1990 г. [8]

Общепринято в метеорологии под волной тепла понимается «значительное потепление, распространяющееся в определенном направлении, связанное с advection теплой массы». Согласно критериям Всемирной метеорологической организации, периодом аномальной жары, или «волной жары» (heat wave), признаются пять или более последовательных дней, когда максимальная дневная температура выше средней максимальной температуры для данной местности на 5 °C (9 °F) или более. При этом средняя температура определяется по периоду с 1961 по 1990 г. Однако некоторые страны используют свои собственные критерии для определения «волны жары» [7].

Росгидромет дает следующее определение «аномально жаркой погоды»: «...в период с апреля по сентябрь в течение 5 дней и более значение среднесуточной температуры воздуха выше климатической нормы на 7°C и более». Это определение волн жары должно использоваться МЧС и другими государственными организациями для классификации опасных погодных явлений (ОЯ). В представленной работе использовался критерий опасных метеорологических явлений Росгидромета. На основании имеющихся данных было подсчитано количество дней и периодов, когда средняя суточная температура воздуха была выше климатической нормы на 7 и более градусов. Эти дни мы определяли как «волны жары» [8].

Для каждого месяца в период с 1990–2019 гг. была составлена таблица, показывающая количество периодов жарких дней, а также количество этих дней в периоде и сумму жарких дней в году за данный месяц. Таблица учитывает также среднюю максимальную температуру для данного месяца, выше которой и считались жаркие дни.

Для выявления «душных» дней из массива данных были выявлены дни со среднесуточной температурой воздуха $\geq 20^{\circ}\text{C}$ и относительной влажностью воздуха $\geq 75\%$. Было определено количество этих дней в месяцах за период с 1990–2019 гг., посчитано суммарное количество дней за каждый год и суммарное количество душных дней за каждый месяц в течение 30 лет.

Результаты

Главной особенностью современных изменений климата является повышение температуры воздуха с середины прошлого столетия. Динамику изменений средней годовой температуры воздуха можно проследить по графику, представленному на рис. 1. Как видим, имеется тенденция к ежегодному повышению средней годовой температуры воздуха, которая описывается уравнением линии тренда $y = 0,05x + 5,5$.

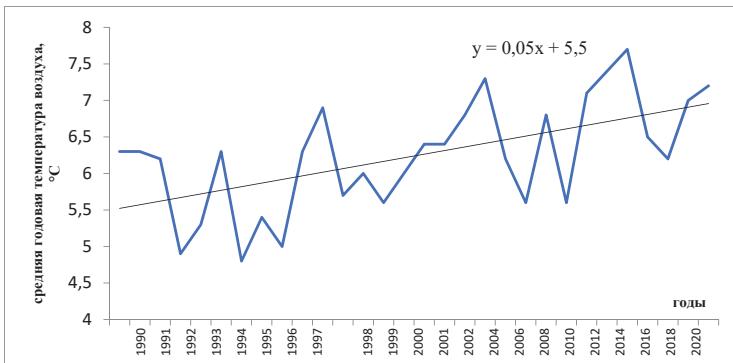


Рис. 1. Динамика изменений среднегодовой температуры в Санкт-Петербурге за 1961–2019 гг.

В Санкт-Петербурге среднее изменение температуры за последние 30 лет (1990–2019 гг.), по отношению к средней температуре принятого Всемирной метеорологической организацией «базового» тридцатилетия 1961–1990 гг., составило $+1,2^{\circ}\text{C}$, в зимний период $+2,3^{\circ}\text{C}$, летние месяцы $+1^{\circ}\text{C}$. Одним из главных последствий изменений климата является увеличение числа дней с аномально высокой или аномально низкой температурой воздуха, т. е. так называемых волн жары и холода.

Ученые прогнозируют значительное увеличение количества дней с экстремально высокими температурами, также учащение волн тепла и сильных осадков. Изменение климата, например, в странах Северного полушария может проявляться в увеличении количества температурных аномалий. Наибольшему негативному влиянию таких волн подвержены жители крупных мегаполисов, каким и является Санкт-Петербург.

В табл. 1 приведено суммарное количество жарких дней в каждом месяце, сумма таких дней за каждый год и среднее количество жарких дней за каждый месяц.

Наибольшее количество жарких дней за исследуемый период лет наблюдается в мае составляет за 231 день. За весь период наблюдений наибольшее количество жарких дней было отмечено в 2010 (57 дней), 2013 (47), 2014 (42), 2018 (57) гг. Как видим, наибольшее количество жарких дней наблюдается в последнее десятилетие. За исследуемый период в одном месяце «волны» жары могли повторяться неоднократно. Таких «волн» может быть несколько маленьких

продолжительностью в 1–3 дня, так и большие продолжительностью до 27 дней. Самый продолжительный период составил 20 дней в июле 2018 г. Самое большое количество жарких дней за месяц было в июле 2010 г. и составило 27 дней.

На рис. 2 представлена динамика жарких дней за период исследования.

Таблица 1

Количество жарких дней за период 1990–2019 гг

Год	Количество дней				Сумма	Год	Количество дней				Сумма
	Май	Июнь	Июль	Август			Май	Июнь	Июль	Август	
1990	0	6	0	4	10	2005	5	3	7	6	21
1991	0	5	0	8	13	2006	7	11	7	9	34
1992	7	11	1	2	21	2007	10	2	0	16	28
1993	16	0	0	1	17	2008	6	1	0	3	4
1994	3	1	8	7	19	2009	8	6	0	1	15
1995	11	18	0	4	35	2010	10	4	27	16	57
1996	5	4	1	7	17	2011	4	9	17	4	34
1997	3	10	6	15	34	2012	11	1	6	4	22
1998	5	9	1	0	15	2013	16	19	2	10	47
1999	4	21	10	3	38	2014	13	4	13	12	42
2000	7	7	0	0	14	2015	6	2	0	8	16
2001	3	3	12	2	20	2016	15	12	5	3	25
2002	10	7	9	13	39	2017	3	0	0	7	10
2003	7	0	13	5	25	2018	19	7	20	11	57
2004	8	3	0	10	21	2019	9	12	2	2	25
Сумма					231		186	167	180	775	
Сред.							8	7	6	7	26

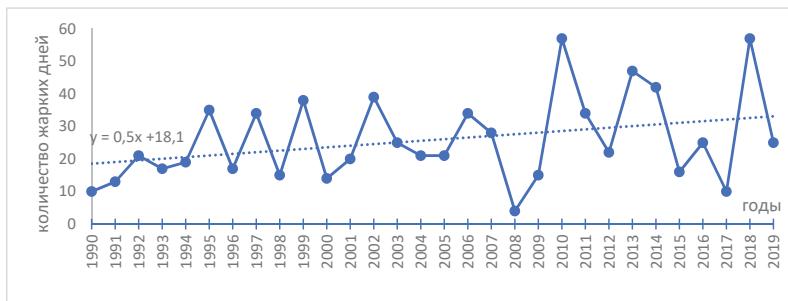


Рис. 2. Динамика жарких дней с мая по август 1990–2019 гг.
на территории г. Санкт-Петербурга

Согласно данным экспертов Федерального медицинского исследовательского центра им. Алмазова смертность от жары в регионах в отдельные периоды может возрастать от 25 до 100 % в зависимости от выраженности и продолжительности жары. Смертность от ишемической болезни сердца может возрастать до 50 %. Около 90 % прироста смертности составляют сердечно-сосудистые причины [10].

В группе риска обычно находятся пожилые люди (старше 65 лет) и дети до 5 лет. Обычно, считается, что женщины более подвержены негативным последствиям жары, чем мужчины. В целом жаркая погода увеличивает загрязненность воздуха, что также сказывается на состоянии здоровья жителей мегаполисов.

Прикованность к постели, как правило, увеличивает риск смерти в 6,5 раз, неспособность каждый день выходить из дома – в 3,5 раза, неспособность к самообслуживанию – в 3 раза, психиатрические заболевания увеличивает риск смерти в 3,6 раза [2; 3].

Наибольшее количество периодов жары продолжительностью более 5 дней наблюдались в мае, июле и августе 2010 г.

Из обзора погоды Петербургского гидрометцентра: «Первая половина месяца была очень жаркой: в отдельные дни температура превышала норму на 11–13 °C. 4 августа в Санкт-Петербурге температура воздуха достигла 34,2 °C – почти на 4 °C был перекрыт максимум этого дня, державшийся с 1912 г. К концу первой декады жара достигла апогея. 7 августа был достигнут абсолютный максимум температуры воздуха, зафиксированный в Санкт-Петербурге за все время инструментальных наблюдений за погодой, – 37,1 °C. Предыдущий рекорд – 35,3 °C, установленный в июле, не продержался и месяца. 8 августа вновь превышен максимум этого дня, державшийся с 1972 г. Термометр в этот день показал 33,7°C» [8].

Как сообщает официальный сайт комитета по делам ЗАГС, в июле 2010 г. умерло 6 тыс. 638 петербуржца (в 2009 г. эта цифра составила 5 тыс. 137 чел.). Чаще всего люди умирали от тепловых ударов, гипертонических кризов и солнечных ожогов, следовательно, 57 жарких дней дают увеличение смертности почти на 1500 чел. [9]

Также нами была проанализирована динамика душных дней. В настоящее время еще нет четко обозначенного понятия «душного» дня. Чаще всего применяется термин, который определяет духоту как сочетание достаточно высокой температуры воздуха с высокой относительной влажностью. Ощущение духоты зависит от совокупности множества различных метеорологических параметров, таких как: солнечная радиация, количество и тип облачности, скорость ветра, температура воздуха и его влажность. При прочих равных условиях, основной причиной возникновения духоты считается определенное сочетание показателей температуры воздуха и относительной влажности. Уже при температуре воздуха в тени +16 °C и 100 % влажности у человека может возникнуть ощущение духоты. В то же время при температуре +26 °C и относительной влажности воздуха 50 % человек будет чувствовать себя вполне комфортно. Физиологи установили, что лучше всего человеком переносится влажность 30–60 %. В пределах этих значений колебания влажности при разных температурах почти не ощущимы человеком. Таким образом, чем меньше относительная влажность воздуха, тем легче переносится жаркая погода [2].

По данным метеорологической станции г. Санкт-Петербурга, нами за период с мая по август каждого исследуемого года были выбраны дни, в которых температура воздуха превышала 20 °C и относительная влажность воздуха была выше или равна 75 % (табл. 2). За весь исследуемый период в мае таких дней не

было. Наибольшее количество душных дней отмечается в июле. Здесь, так же, как и с динамикой жарких дней, увеличивается количество душных дней в последнее десятилетие.

Таблица 2

Количество душных дней с относительной влажностью ≥ 75 % и среднесуточной температурой воздуха ≥ 20°C в г. Санкт-Петербург за период 1990–2019 гг.

Год	Количество дней			Сумма	Год	Количество дней			Сумма
	Июнь	Июль	Август			Июнь	Июль	Август	
1990	0	3	2	5	2005	0	1	2	3
1991	0	0	2	2	2006	0	0	1	1
1992	0	0	0	0	2007	0	0	4	4
1993	0	0	0	0	2008	0	0	2	2
1994	0	4	1	5	2009	1	2	0	3
1995	1	5	0	6	2010	0	4	2	6
1996	0	0	6	6	2011	0	4	2	6
1997	0	4	2	6	2012	0	1	1	2
1998	0	0	0	0	2013	2	1	2	5
1999	4	0	0	4	2014	0	1	1	2
2000	2	4	0	6	2015	0	0	1	1
2001	0	8	1	9	2016	0	4	1	5
2002	0	4	2	6	2017	0	0	2	2
2003	0	4	1	5	2018	0	3	1	4
2004	0	8	4	12	2019	0	0	0	0
Сумма						10	65	43	118
Средн.									8

Заключение

Был проведен анализ динамики «волны жары» и душных дней за 30-летний период. Исследование показало, что наряду с увеличением средней годовой температуры воздуха наблюдается увеличение продолжительности и количества аномально жарких и душных дней, которые могут привести к увеличению смертности жителей. Особенно интенсивное увеличение наблюдается в последнее десятилетие.

Список литературы

1. Виноградова В. В. Волны тепла на Европейской территории России в начале XXI в. // Известия РАН. Серия географическая. 2014. № 1. С. 47–55.
2. Ревич Б. А. Волны жары в мегаполисах и пороги их воздействия на смертность населения // Гигиена и санитария. 2017. № 96(11). С. 1073–1078.
3. Периоды сильной жары: угрозы и ответные меры / Koppe C., Kovats S., Jendritzky G., Menne B.; Всемирная организация здравоохранения. Европ. регион. бюро, 2005. 119 с.
4. IPCC. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/> (дата обращения: 10.10.2022).
5. IPCC. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (дата обращения: 08.10.2022).
6. ООН. URL: <https://news.un.org/ru/story/2022/09/1431371> (дата обращения: 08.10.2022).
7. ВМО. URL: <https://library.wmo.int/> (дата обращения: 08.10.2022).
8. ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». URL: <http://www.meteo.ru/articles/index> (дата обращения: 08.10.2022).
9. Комитет по делам записи актов гражданского состояния. URL: <http://kzags.gov.spb.ru> (дата обращения: 08.10.2022).
10. ФГБУ «НМИЦ им. В. А. Алмазова». URL: <http://www.almazovcentre.ru> (дата обращения: 08.10.2022).

УДК 551.524.36

Исследование положительных аномалий приповерхностной температуры воздуха по данным реанализа ERA5

А. А. Збиранник (anna24andreevna@gmail.com)

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

Аннотация. Проведена оценка площади, продолжительности и сезонной повторяемости волн тепла, а также сравнение этих характеристик для двух пятилетних периодов – 1995–1999 гг. и 2015–2019 гг. Для анализа использованы данные о температуре воздуха на уровне 2 м из реанализа ERA5.

Ключевые слова: тепловая аномалия, приповерхностная температура, реанализ, климатические изменения, волны тепла.

Одним из последствий наблюдаемого глобального изменения климата является увеличение случаев экстремальных погодных явлений, таких как волны тепла, засухи, наводнения, лесные пожары и др. В связи с этим тема волн тепла в последние годы является одной из наиболее активно обсуждаемых в области исследований изменения климата [5; 6]. Понятие «тепловая волна» сильно зависит от региона и не имеет четкого универсального определения. Всемирная метеорологическая организация определяет волну тепла, как превышение средней максимальной суточной температуры на 5 °C и более в течение 5 и более суток [6]. В общем случае это событие аномально высокой температуры воздуха, часто сопровождающейся повышенной влажностью.

Возникают волны тепла в основном в области малоподвижных систем высокого давления, в тыловой части которых происходят непрерывные затоки теплого влажного воздуха [6]. Многие авторы сходятся во мнении, что частые интенсивные температурные аномалии нельзя объяснить только естественными факторами, без учета антропогенного влияния на климат [3–5]. В ряде исследований была выявлена положительная связь между стремительным увеличением городской застройки и частотой событий с тепловыми волнами [2; 5].

Данная тема является крайне актуальной не только для социально-экономической, но и для медицинской сферы, поскольку с сильными волнами тепла, зафиксированными в последние десятилетия, связана значительная смертность. Так сильная тепловая волна, наблюдавшаяся в России в 2010 г., вызвала значительную потерю урожая, многочисленные лесные пожары и около 55 тыс. смертей. В большинстве работ подчеркивается, что этот вопрос может стать все более актуальным в ближайшем будущем, особенно для городских густонаселенных территорий [3; 6].

Целью данной работы является оценка площади, а также временного хода волн тепла над территорией юга Западной Сибири.

Материалы и методы исследования

Для исследования была выбрана территория, расположенная между 50 и 60° с. ш. и 70 и 90° в. д. (рис. 1). Она охватывает юг Западной Сибири, часть Красноярского края и Северного Казахстана.

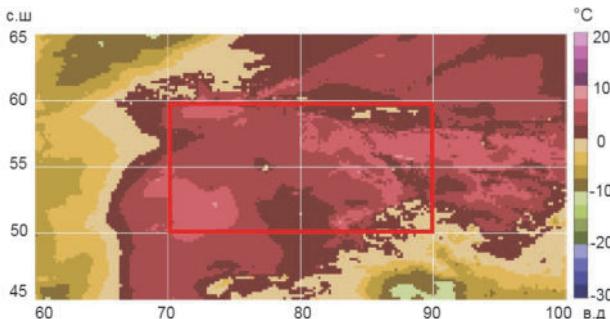


Рис. 1. Отображение рассчитанных данных на примере события с тепловой волной 26.04.2017. Территория исследования выделена красным прямоугольником

Для расчетов были отобраны максимальные суточные температуры по данным реанализа ERA5 (с пространственным разрешением $0,2 \times 0,2^\circ$ сетки) за период с 1988 по 2020 г. Для каждого узла сетки был рассчитан 90 перцентиль, и определялся процент узлов сетки, где температура на уровне 2 м превышала пороговое значение.

Для анализа отбирались только случаи, когда заданное условие выполнялось на протяжении 5 и более суток, а процент узлов сетки составлял 10 % и более. Полученный набор событий был разделен на два пятилетних периода – с 1995 по 1999 г. и с 2015 по 2019 г. Первый временной интервал был выбран, как период наибольшей скорости потепления в России [1], второй отражает температурные изменения последних лет.

Результаты

За период с 1995 по 2019 г. всего было выявлено 85 событий с тепловой аномалией. В период с 2015 по 2019 г. встретилось на 22 % меньше случаев волн тепла, чем с 1995 по 1999 г. Средняя продолжительность тепловой волны составила 9 сут. Стоит отметить, что встречались случаи, когда температурная аномалия держалась на исследуемой территории более 20 дней. Самая «долгоживущая» волна тепла наблюдалась с 25.07.1998 по 17.08.1998, ее продолжительность составила 23 дня. За период с 2015 по 2019 г/ максимальная временная протяженность тепловой волны составила 16 сут.

Оценка продолжительности и временного хода. На рис. 2 показано процентное соотношение событий разной продолжительности к их общему числу за период. Анализ показал, что в последнюю пятилетку температурные аномалии продолжительностью 6–10 дней наблюдались немного реже, однако более долгие события (11–16 дней) наоборот встречались чаще, чем в период с 1995 по 1999 г. Однако чаще всего продолжительность тепловой волны в обоих случаях составляет 7–10 дней.

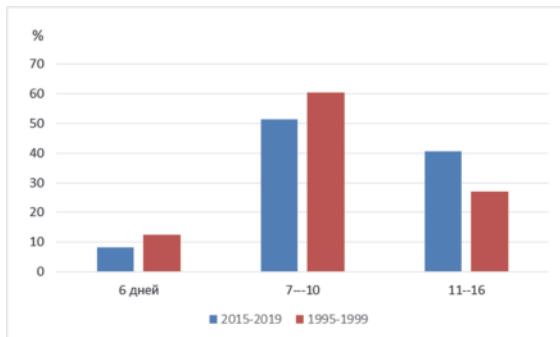


Рис. 2. Доля волн тепла различной продолжительности к их общему числу

Что касается годового хода, то здесь максимальное количество событий с волнами тепла приходится на август не зависимо от рассматриваемого периода (рис. 3). Однако минимальная повторяемость случаев расходится для пятилетних интервалов. Наименьшее число событий в период с 1995 по 1999 г. приходился на июнь и март, стоит заметить, что в январе они не отмечались вовсе. В 2015–2019 гг. минимум повторяемости тепловых волн наблюдался в июле и октябре, в ноябре аномалии не наблюдались.

Оценка площади, занимаемой волнами тепла. Анализ пространственной протяженности для двух выбранных пятилетних периодов показал, что процент занимаемой волнами тепла площади в 2015–2019 гг. больше, чем в 1995–1999 гг. Для периода с 2015 по 2019 г. максимальная протяженность волны приходится на 6 день и составляет в среднем 52 % от общей площади территории исследования ($727\,474 \text{ км}^2$). Для волн, встречавшихся с 1995 по 1999 г., характерно наличие двух пиков занимаемой площади – 5 и 9 день волны (рис. 4).

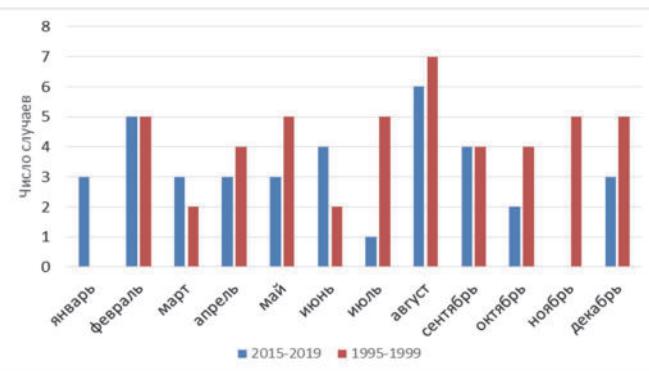


Рис. 3. Годовой ход повторяемости событий с тепловой волной

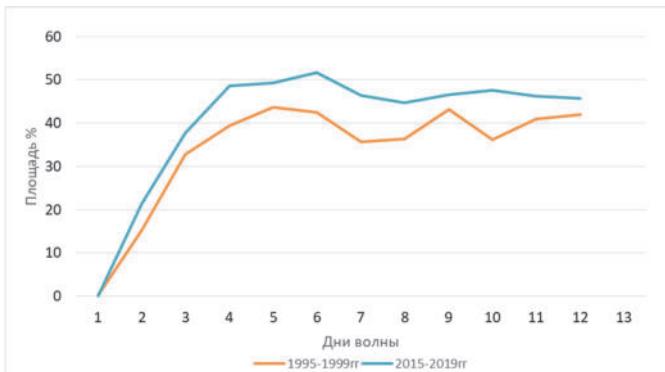


Рис. 4. Процент площади занятой волной тепла для двух периодов

Оценка площади тепловой волны проводилась отдельно для теплого и холодного периодов года. Для этого были отобраны только события летних и зимних месяцев. Как видно из рис. 5, в зимний сезон волны тепла занимали большие площади, чем в летний, это характерно для обоих пятилеток. Пик занимаемой площади в летние месяцы приходится на 5 день в обоих периодах, однако процент покрытой территории заметно различается. Для летних событий 2015–2019 гг. максимальный процент площади составил 54,3 % ($759\ 651\ \text{км}^2$), а для событий 1995–1999 гг. на порядок меньше – 36 % ($503\ 636\ \text{км}^2$).

Заключение

В результате исследования пространственной и временной протяженности тепловой аномалии приповерхностной температуры воздуха были сделаны следующие основные выводы. Волны тепла могут встречаться в любой месяц года, однако чаще всего наблюдаются в августе. Их средняя продолжительность 9 сут. Чаще всего встречались события, длившиеся 7–10 дней, реже до 16 дней. Кроме того, в 1995–1999 гг. встречались редкие случаи, когда тепловая волна на территории исследования длилась более 20 сут. Однако за более поздний пятилетний период волн тепло продолжительностью более 16 сут. не встречалось.

Волны тепла покрывают максимум площади территории на 5 день. В холодный период года пространственная протяженность тепловых аномалий больше, чем в теплый. Волны тепла, отмеченные с 2015 по 2019 г., занимали большие площади сложной пространственной конфигурации, но имели меньшую продолжительность, чем в более ранний период.

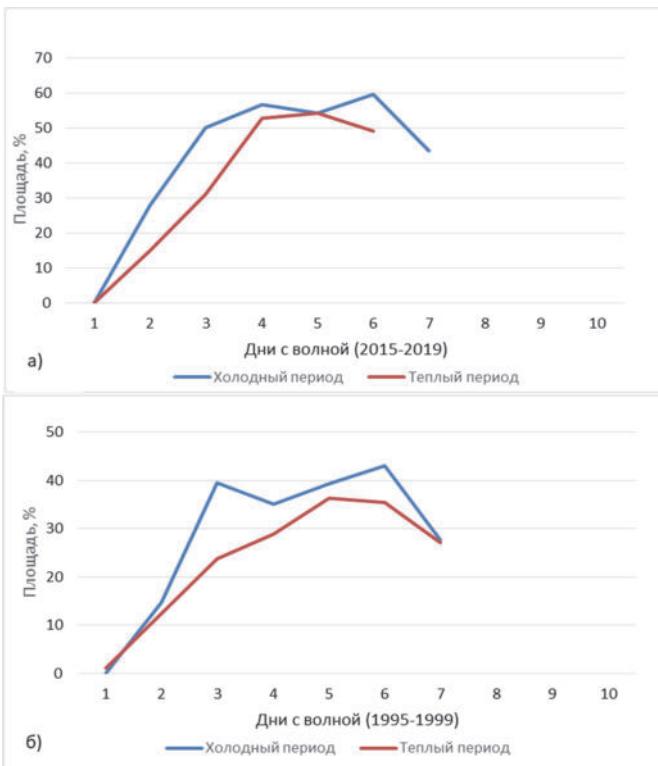


Рис. 5. Доля площади, занятой тепловой волной в холодный и теплый периоды года, а – для периода с 2015 по 2019 г., б – для периода с 1995 по 1999 г.

Список литературы

1. Влияние атмосферной циркуляции на температурный режим Сибири / В. П. Горбатенко, И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, С. В. Логинов, Н. В. Поднебесных, Е. В. Харютина // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 15–21.
2. Ермакова Е. В. Оценка влияния запечатанности поверхности почвенного покрова на распределение температуры поверхности в условиях города на примере юго-восточного округа г. Москвы // Вестник ОГУ. 2011. № 12. С. 131.
3. CSSR 2017: Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment / D. J. Wuebbles, D. W. Fahey, K. A. Hibbard, D. J. Dokken, B. C. Stewart, and T. K. Maycock (eds.) // U. S. Global Change Research Program. 2017. Vol. I. 470 p.
4. IPCC 2014: Climate change, 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. 2014. P. 151
5. Kaplan G., Avdan U., Avdan Z. Y. Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data: A Case Study in Skopje, Macedonia // Sciforum Electronic Conference Series. 2018. Vol. 2. P. 5.
6. Marx W., Haunschmid R., Bornmann L. Heat waves: a hot topic in climate change research // Theoretical and Applied Climatology. 2021. Vol. 2, N 146. P. 781–800.

УДК 551.509.327:551.515.3

Распознавание угроз образования смерчей над Черным морем на базе машинного обучения

О. В. Калмыкова (kov@feerc.ru)

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск

Аннотация. Рассматриваются вопросы распознавания смерчеобразующих облаков над Черным морем с использованием моделей машинного обучения. Решается задача классификации объектов, в роли которых выступают конвективные облака. Для получения исходного набора параметров (признаков) объектов применяется разработанная схема идентификации и прослеживания конвективных систем по результатам анализа данных о радиолокационной отражаемости. Приводится описание построенных моделей классификации, дается их физическая интерпретация. Анализируются результаты работы моделей в теплый конвективный период 2022 г.

Ключевые слова: смерч, смерчеобразующее облако, Черное море, схема идентификации и прослеживания конвективных систем, машинное обучение, дерево решений, случайный лес, логистическая регрессия.

Введение

За последние несколько лет участились случаи возникновения черноморских смерчей в опасной близости к побережью. Так, в 2020 г. было зарегистрировано четыре смерча с выходом на берег и три случая близкого подхода смерчей к побережью. В 2021 г. три смерча вышли на берег, один близко подошел к берегу. В 2022 г. известно о трех смерчах, вышедших на сушу. К счастью, во всех случаях, выйдя на сушу, смерчи сразу же разрушались, оставляя после себя лишь кратковременное усиление ветра. Для минимизации возможного ущерба от выхода смерчей важно своевременно распознать угрозу их образования.

Для краткосрочного прогноза черноморских смерчей был разработан региональный индекс смерчеопасности WRI [1]. Он позволяет выделить области риска образования смерчей, и тем самым локализовать смерчеопасные участки побережья. Индекс WRI показывает достаточно хорошие результаты в теплый смерчеопасный период – предупрежденность смерчей доходит до 92 %. Однако, как и многие индексы конвективной неустойчивости, индекс WRI имеет свойство прогнозировать опасность с некоторой долей избыточности. Иными словами, наличие положительного прогноза смерчеопасности по индексу WRI не всегда связано с реальными случаями их образования. Обратная зависимость является куда более строгой – при отсутствии прогноза смерчеопасности вероятность образования смерчей крайне мала. С учетом приведенных особенностей индекс WRI может быть использован как первое приближение при построении прогноза смерчей.

Для уточнения прогноза смерчеопасности с целью распознавания потенциальных смерчеобразующих облаков был разработан алгоритм анализа радиолокационных данных [2]. В основу алгоритма был положен пороговый принцип выявления областей с высокими значениями радиолокационных характеристик.

По этим областям диагностируются зоны риска с возможными опасными явлениями, в том числе смерчами. Как показали результаты тестирования, данный алгоритм ввиду его достаточно широкой сферы применения не всегда способен заблаговременно распознать угрозу возникновения смерчей. Это связано в том числе с тем, что не все смерчеобразующие облака по своим радиолокационным характеристикам достигают используемых в вышеуказанном алгоритме пороговых значений (точность распознавания может варьироваться от 48 до 66 %). Таким образом, возникает необходимость построения нового физически обоснованного алгоритма, учитывающего известные особенности смерчевых облаков.

Для разработки нового алгоритма был использован перспективный и широко применяемый во многих областях подход к машинному обучению, который предусматривает несколько этапов работы:

- постановка задачи – в данном случае решалась задача бинарной классификации облаков (смерчеобразующие облака (класс W) и облака без смерчей (класс NW));
- описание объектов – формирование признакового пространства;
- разметка объектов – отнесение их к определенному классу;
- предобработка данных – оценка распределения признаков, фильтрация выбросов, оценка степени корреляции признаков, их нормализация;
- выбор модели и параметров обучения;
- обучение модели;
- тестирование модели.

Описание конвективных облаков

Для получения исходных данных об облаках со смерчами и без них использовалась разработанная схема идентификации и последующего прослеживания конвективных систем по данным о радиолокационной отражаемости. По результатам работы данной схемы формируется набор объектов с соответствующими радиолокационными характеристиками. Выделение границ конвективных систем осуществляется по пороговому значению в 30 dBZ, это так называемая фоновая область. В ходе анализа случаев регистрации опасных явлений на европейской территории России установлено, что именно с эти порогом чаще всего связано первое обнаружение соответствующих систем на радиолокационных изображениях. В границах фоновой области конвективных систем осуществляется поиск зон активной конвекции (ЗАК) – областей с запредельными значениями радиолокационной отражаемости. Это области, в которых с высокой долей вероятности могут диагностироваться опасные явления. Для выявления ЗАК используется адаптивный порог, выбираемый исходя из анализа значений радиолокационной отражаемости в пределах фоновой области. Таким образом, конвективные системы могут описываться как простыми объектами, так и объектами с вложенными областями ЗАК. На рис. 1 показано смерчеобразующее облако в форме полигонального объекта с соответствующими атрибутивными данными (представлены наиболее значимые радиолокационные характеристики).

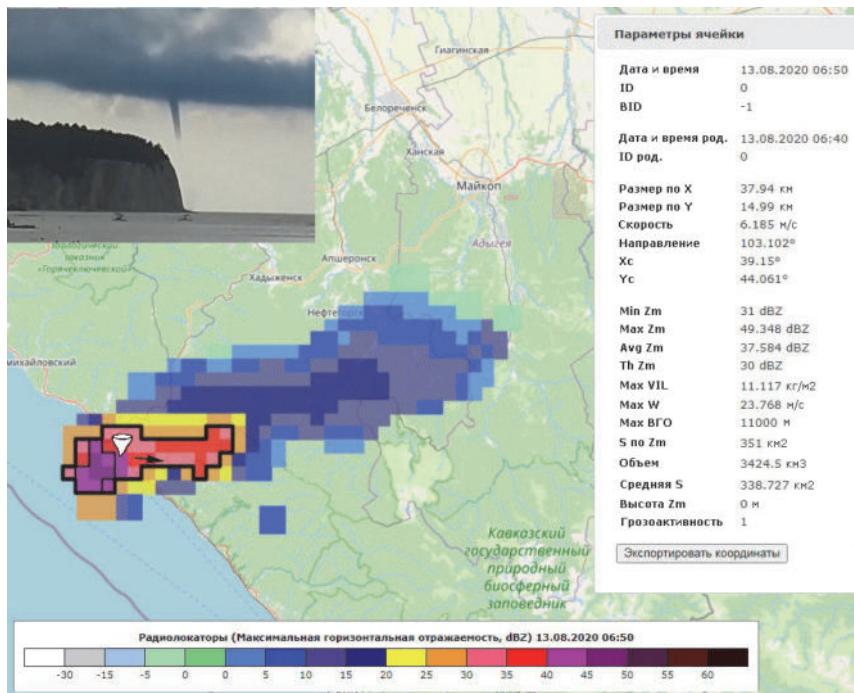


Рис. 1. Конвективное облако со смерчем вблизи г. Туапсе 13 августа 2020 г.
(стрелкой показано направление его перемещения)

После первого обнаружения объекта производится его прослеживание – устанавливаются связи между объектами на последовательных по времени радиолокационных изображениях. Таким образом, формируется история состояний объекта, по которой рассчитываются дополнительные радиолокационные характеристики. Схема прослеживания опирается на анализ коэффициента корреляции между объектами по значениям максимальной отражаемости (r_{Zm}), кроме того, учитывается степень подобия объектов по объему (s_V) и в пространстве (s_R). Поиск наиболее подходящего потомка для рассматриваемого родителя производится в окрестности, радиус которой соответствует максимально возможному расстоянию, на которое могла бы переместить конвективная система за последующий момент времени. Для выбора потомка строится решающая функция вида:

$$f = r_{Zm} + s_V + s_R. \quad (1)$$

Потомком назначается объект, которому соответствует максимальное значение решающей функции.

Среди множества радиолокационных характеристик для использования в моделях классификации были выбраны 26 параметров, которые в зависимости

от алгоритма их расчета могут быть разделены на четыре группы (табл.). Выбор параметров был обусловлен предположением о том, что мгновенные значения радиолокационных характеристик и скорости их изменения могут быть хорошими индикаторами процессов, связанных со смерчегенезом. Отсутствие в списке параметров характеристик ветра – доплеровской скорости – объясняется тем, что ввиду небольших горизонтальных размеров вихря (от 3 до 150 м) на картах доплеровской скорости зоны завихренности (области с разными знаками скорости), как правило, не локализуются или локализуются в редких случаях. Как следствие, данный параметр для водяных смерчей оказывается малоинформативным.

Таблица

Перечень признаков, используемых для построения моделей классификации

Группа	Список признаков
Мгновенные значения радиолокационных характеристик	Максимальная горизонтальная отражаемость (max_zm), максимальная вертикально интегрированная водность (max_vil), максимальная высота верхней границы облачности (max_h), максимальная скорость конвективного потока (max_w), объем облака (volume), отметка грозоактивности облака (is_thunder), площадь сечения облака на максимальном уровне положительных значений горизонтальной отражаемости (max_pos_z_s), высота столба с большими значениями дифференциальной отражаемости (> 5 dB) (column_depth), разность максимального уровня положительных значений горизонтальной отражаемости и уровня верхней границы столба дифференциальной отражаемости (dif_h-col2)
Скорости изменения значений радиолокационных характеристик	Скорость изменения max_zm (ds_max_zm), скорость изменения max_vil (ds_max_vil), скорость изменения max_h (ds_max_h), скорость изменения max_w (ds_max_w), скорость изменения volume (ds_volume)
Максимальные значения радиолокационных характеристик за последние 60 мин	Максимальное значение max_zm (max_max_zm), максимальное значение max_vil (max_max_vil), максимальное значение max_h (max_max_h), максимальное значение max_w (max_max_w), максимальное значение volume (max_volume), частота диагностирования грозовых разрядов в облаке в процентном соотношении (thunder_freq), максимальное число непрерывных шагов роста облака по вертикали (max_up_jumps_cnt)
Максимальные скорости изменения значений радиолокационных характеристик за последние 60 мин	Максимальная скорость изменения max_zm (max_ds_max_zm), максимальная скорость изменения max_vil (max_ds_max_vil), максимальная скорость изменения max_h (max_ds_max_h), максимальная скорость изменения max_w (max_ds_max_w), максимальная скорость изменения volume (max_ds_volume)

Построение моделей классификации конвективных облаков

Для построения моделей классификации использовались данные о смерчах над Черным морем за период с 2019 по 2021 г. По результатам применения разработанной схемы идентификации и прослеживания конвективных систем был сформирован набор данных о 81 объекте, относящемся к классу W (смерчеобразующие облака). Случайным образом были отобраны данные класса NW об облаках без смерчей. Для имитации реальной ситуации объектов класса NW было сформировано заведомо большое, чем объектов класса W. В качестве эксперимента использовалось процентное соотношение 5:1.

Разработка моделей классификации и все операции по работе с данными производились средствами языка Python. При этом использовались библиотеки scikit-learn (для машинного обучения), pandas (для анализа данных), matplotlib и seaborn (для визуализации данных).

Предварительная обработка данных показала, что большинство признаков имеет нормальное распределение или близкое к нему. Между некоторыми признаками (7 пар) была выявлена высокая степень положительной корреляции (до 0,9). Это, например, пары max_zm и max_w, max_h и max_max_h и др. Несмотря на это было принято решение не исключать коррелирующие признаки из моделей, поскольку в машинном обучении нет четких правил, при каком пороге корреляционной зависимости следует проводить подобное исключение. В соответствии с известными рекомендациями с помощью класса StandartScaler была проведена стандартизация пространства признаков, в ходе которой значения каждого признака были промасштабированы до нулевого среднего и единичного стандартного отклонения. Данная процедура позволяет без потери информации достичь равнозначимости признаков. Перед обучением совокупная выборка данных об объектах класса W и NW была разделена на два подмножества: обучающее (70 %) и тестовое (30 %). Методом бутстрэпа размер обучающей выборки был увеличен в 5 раз.

Для решения задачи классификации на исходном наборе данных было проведено предварительное тестирование нескольких моделей машинного обучения:

- дерево решений DecisionTreeClassifier (DT)
- случайный лес RandomForestClassifier (RF)
- логистическая регрессия LogisticRegression (LR)
- стохастический градиентный спуск SGDClassifier
- модель k-ближайших соседей KNeighborsClassifier
- модель опорных векторов SVC
- нейронная сеть (многослойный перцептрон) MLPClassifier
- модель адаптивного бустинга AdaBoostClassifier
- модель градиентного бустинга GradientBoostingClassifier
- модель оптимизированного градиентного бустинга XGBClassifier (библиотека xgboost)

Наилучшие результаты показали первые три модели. Это достаточно простые модели, и в данном случае их высокая результативность, по-видимому, была обусловлена небольшим размером исходной выборки данных.

С отобранными моделями были проведены дальнейшие вычислительные эксперименты, в ходе которых с помощью метода `train_test_split` модуля `model_selection` случайным образом производилось разбиение исходного набора данных на тестовую и обучающую выборки. После этого проводилось повторное обучение моделей и оценивалось качество их работы. При оценке качества в первую очередь анализировалось значение показателя предупрежденности смерчей – то насколько хорошо построенные модели распознавали смерчеобразующие облака. В итоге для каждой модели была выбрана ее наилучшая конфигурация. Модели в их наилучших конфигурациях на тестовом наборе данных показали следующие результаты по предупрежденности смерчей: модель DT – 83 %, модель RF – 88 %, модель LR – 100 %.

Для моделей DT и RF была проведена оценка значимости признаков. На рис. 2 и 3 для каждой модели показан перечень признаков, отсортированный по коэффициенту Джинни (показатель качества разбиения в задачах классификации).

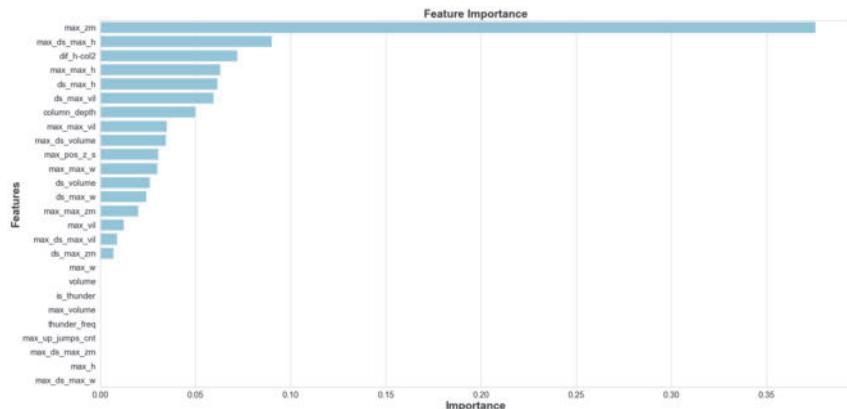


Рис. 2. Ранжирование признаков по степени значимости в модели DT

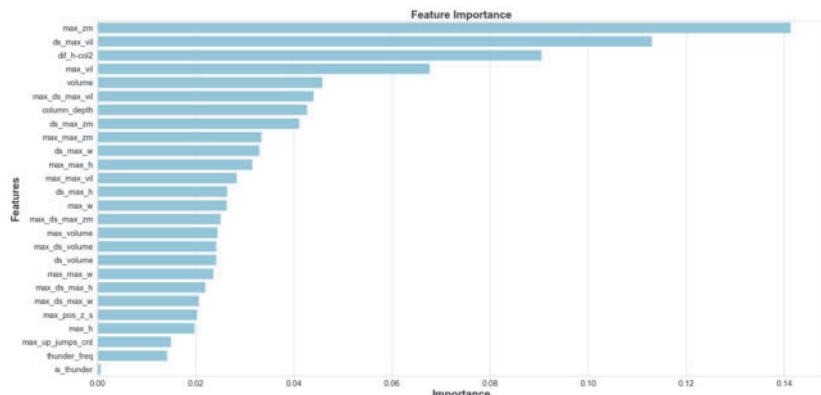


Рис. 3. Ранжирование признаков по степени значимости в модели RF

Из рис. 2, 3 видно, что для обеих моделей важнейшим критерием разграничения смерчеобразующих облаков и облаков без смерчей является мгновенное значение максимальной отражаемости, при этом для дерева решений этот признак существенно выделяется на фоне других признаков. Таким образом, в соответствии с построенным моделями со смерчеобразующими облаками должны быть связаны большие значения максимальной отражаемости (для модели DT больше 38 dBZ), которые, как известно, указывают на наличие в облаке крупных частиц, возникающих вследствие сильных вертикальных движений внутри облака. На втором месте после отражаемости идут признаки, относящиеся к скоростям изменения в модели DT высоты верхней границы облачности, в модели RF – вертикально интегрированной водности. По этим признакам можно выделить быстро развивающиеся облака. На третьем месте в обеих моделях по значимости стоит признак, позволяющий оценить расположение столба с большими значениями дифференциальной отражаемости. Известно, что в водяных смерчах происходит вынос крупных капель воды в верхнюю часть облака, где они сплющиваются [3]. Локализовать области с «приплюснутой» формой гидрометеоров можно по большим положительным значениям дифференциальной отражаемости ($> 5 \text{ dB}$). В случае если подобные значения фиксируются на нескольких подряд идущих вертикальных уровнях, то говорят о наличии соответствующего столба. В облаках с водяными смерчами, как уже было упомянуто выше, столбы с крупными приплюснутыми каплями должны располагаться в верхней части облака. Признак *dif_h-col2* как раз отвечает за выделение облаков с требуемыми свойствами. Чем меньше значение данного признака, тем ближе к верхней границе располагается столб дифференциальной отражаемости, тем больше вероятность того, что в рассматриваемом облаке может или уже формируется смерч.

Тестирование моделей на независимом наборе данных

С июня по сентябрь 2022 г. проводилось тестирование работы моделей классификации DT, RF и LR. В ходе тестирования в оперативном режиме каждой выявленной конвективной системе с момента после ее первого обнаружения и до момента ее распада по моделям прогнозировался класс опасности: смерчеобразующая система или система без смерчей. Модели классификации используют информацию об истории состояний системы, поэтому в момент ее первого обнаружения классификация не производится.

В 2022 г. в течение рассматриваемого периода побережья Краснодарского края было зарегистрировано 26 смерчей, что крайне мало по сравнению с предыдущими годами. Лето 2022 г. практически на всей европейской территории России оказалось аномально жарким. По-видимому, подобные климатические аномалии и стали одной из причин снижения числа черноморских смерчей, которые, как известно, чаще всего возникают в результате мощных вторжений холода на Кавказ, в условиях, присущих тыловым частям циклонов [4].

По результатам тестирования было проанализировано качество классификации материнских облаков для 14 смерчей с известным временем их возникновения. Рассматривались только те смерчи, которые достигали поверхности воды,

поскольку именно на такие «полноценные» смерчи были сориентированы построенные модели классификации. Предупрежденность смерчей (точность классификации в момент регистрации смерча) по модели DT составила 79 %, по модели RF – 93 %, по модели LR – 93 %, по композиции моделей – 71 %. Для сравнения по ранее разработанному алгоритму порогового распознавания точность классификации составила лишь 29 %.

Тестирование моделей в оперативном режиме показало, что помимо распознавания смерчеобразующих облаков, т. е. присвоения им соответствующего класса в момент регистрации смерча, модели могут заблаговременно выявлять (прогнозировать) опасность смерчегенеза. Очевидно, это связано с тем, что модели оказываются чувствительными к вариациям радиолокационных характеристик, которые имеют место при смерчегенезе и которые могут проявляться за некоторое время до возникновения смерча. Заблаговременность прогноза может варьироваться от 10 мин до нескольких часов. При оценке качества прогноза предполагалось, что на опасность возникновения смерча может указывать присвоение соответствующего класса опасности как минимум дважды за время жизни материнского облака до появления смерча. С учетом этого были получены следующие оценки заблаговременной предупрежденности смерчей: по модели DT – 50 %, по модели RF – 58 %, по модели LR – 92 %, по композиции моделей – 42 %. Если снизить требование на присвоение класса смерчопасности до минимум одного раза (до регистрации смерча) некоторые оценки будут чуть выше: по модели DT – 75 %, по модели RF – 83 %, по композиции моделей – 75 %. Значения заблаговременной предупрежденности по алгоритму порогового распознавания – 17 % (25 % при снижении требования).

На рис. 4 и 5 показана динамика спрогнозированного класса опасности для двух конвективных облаков, из которых возникли смерчи в 2022 г., по каждой модели и на основе их композиции. По вертикальной оси указан класс опасности, закодированный следующими значениями: 1 – смерчопасность, 0 – отсутствие угроз, -1 – класс не определен. На оси времени красными кружками обозначены моменты регистрации смерчей. В первом случае (рис. 4) угроза смерчеобразования была выявлена по двум моделям RF и LR, смерч возник спустя 30 мин после образования облака. Смерчопасность прогнозировалась и после регистрации смерча, а также под конец жизни материнского облака. Во втором случае (рис. 5) угроза смерчеобразования была успешно спрогнозирована по всем моделям. Рассматриваемый смерч вышел на побережье, в результате чего было повреждено уличное кафе.

Дополнительно была проведена оценка доли ложных прогнозов в течение всего анализируемого периода. По модели RF это соотношение составило 12 %, по модели DT – 17 %, по модели LR – 45 %, по алгоритму порогового распознавания – 12 %. Композиция моделей RF, DT и LR позволила достичь минимального значения ложных тревог в 9 %.



Рис. 4. Динамика спрогнозированного класса опасности для материнского облака смерча, возникшего 22 июня 2022 г. вблизи г. Туапсе

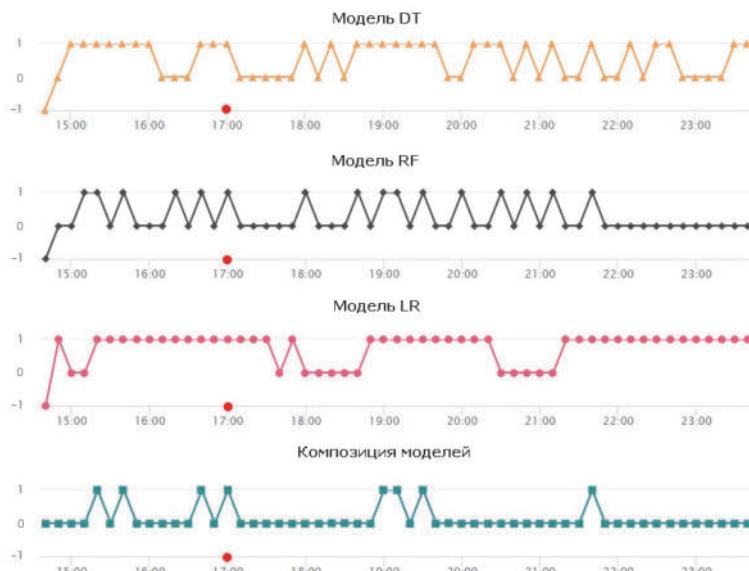


Рис. 5. Динамика спрогнозированного класса опасности для материнского облака смерча, возникшего 22 июля 2022 г. вблизи с. Агой Туапсинского района

Заключение

Точность прогноза смерчей может быть существенно повышена за счет использования данных оперативных наблюдений. В данной работе на основе подхода к машинному обучению были построены три модели классификации конвективных облаков, использующие в качестве параметров значения радиолокационных характеристик. В ходе непрерывного тестирования модели показали достаточно хорошие результаты по предупрежденности смерчей (до 92 %). В дальнейшем за счет накопления новых данных о смерчах предполагается усовершенствовать уже имеющиеся модели и провести их тестирование в течение более продолжительного периода времени.

Список литературы

1. Калмыкова О. В. Прогноз угроз возникновения смерчей вблизи Черноморского побережья России на базе выходной продукции мезомасштабной модели COSMO-Ru2 с использованием регионального индекса смерчеспособности // IV Всероссийская конференция «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». Иркутск, 24–26 нояб. 2021 г. : сб. тр. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2021. С. 284–293.
2. Калмыкова О. В., Шершаков В. М., Новицкий М. А., Шмерлин Б. Я. Автоматизированный прогноз смерчей у Черноморского побережья России: первый опыт и оценка его результативности // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 84–94.
3. Радиофизические характеристики облаков со смерчами / Ю. П. Михайловский, В. Б. Попов, А. А. Синькевич, А. М. Абшав, М. Л. Торопова, Л. В. Кашиева // Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ». 2020. С. 196–197.
4. Снитковский А. И. Смерчи на территории СССР // Метеорология и гидрология. 1987. № 9. С. 12–25.

УДК 551.515.4

Пространственно-временной анализ грозовой активности выше 60° с. ш.

К. А. Кравец (foreveryoungfox@mail.ru)¹, О. Е. Нечепуренко (o.e.nechepurenko@gmail.com)^{1,2}, И. В. Кужевская (irinakuzhevskaia@gmail.com)¹, В. В. Чурсин (skriptym@mail.ru)^{1,3}

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
²ИМКЭС СО РАН, Томск

³СЦ ФГБУ НИЦ «Планета», Новосибирск

Аннотация. Представлен пространственный и временной анализ грозовой активности выше 60° с. ш., а также в Арктическом секторе РФ за 7 полных лет (с 2015 по 2021 г.). На всей рассматриваемой территории прослеживается тенденция увеличения числа дней с грозой. Переходы происходят медленно, однако, прослеживаются четко. В среднем для северных регионов характерно начало грозового периода в мае, окончание – в сентябре. Пик количества гроз наблюдается в июле. При движении с запада на восток количество гроз уменьшается. Наибольшее число грозовых дней за весь период прослеживается на станциях Тюменской области.

Ключевые слова: гроза, глобальные изменения климата, Арктика, высокие широты, метеорологические станции.

Изучение пространственно-временной изменчивости грозовой активности в северных районах, где подобные явления довольно редки, в последние десятилетия является крайне актуальной темой. В первую очередь, это связано с возросшим вниманием к глобальным изменениям климата на планете. Многие научные и различные институты по всему миру впервые сталкиваются со столь явными последствиями и фактами – грозы на севере и вблизи Полярного круга фиксируются все чаще. Арктика всегда притягивала внимание самых разных научных сфер. Сведений, интересных с точки зрения метеорологии, недостаточно, и в эпоху климатических перемен более внимательное изучение северных широт становится необходимостью, чем и обусловлена новизна настоящей работы.

Мониторинг грозовой активности важен по целому ряду причин: молния создает реальную угрозу жизни и здоровью людей, влечет за собой материальный ущерб, грозы провоцируют крупные лесные пожары в Арктике, как следствие, происходит выделение дополнительного углекислого газа, хранящегося в биомассе и вечномерзлых почвах [5]. Велика вероятность увеличения числа грозовых явлений в последующие десятилетия.

Материалом для исследования настоящей работы служит информация о количестве грозовых дней, представленная в виде кода WAREP, для временного промежутка в 7 полных лет (2015–2021 гг.) над территориями севернее 60° и Арктическим районом РФ.

Методика заключается в следующем: формирование массива метеостанций выше 60° с. ш., составление базы данных по опасным конвективным явлениям из журнала WAREP за 7-летний период, анализ изменений грозовой активности, сравнение числа дней в году с грозой с климатологическими показателями, представление полученных результатов в ГИС-картированном виде.

Количество метеорологических станций, соответствующих основному критерию отбора по широте, а также с фиксацией опасного конвективного явления «гроза», составляет 40; среди них 8 пунктов, относящихся к Арктическому сектору, анализируемых отдельно.

При выделении границ Арктики применяются следующие трактовки, систематизированные специальной комиссией при Арктическом совете – АМАР – рабочая группа Арктического Совета под названием «Программа Арктического мониторинга и оценки» (The Arctic Monitoring and Assessment Programme):

- по широте Северного полярного круга (66,5° с. ш.);
- по июльской изотерме +10 °C;
- по границе безлесной территории;
- по океанической границе Северного ледовитого океана с учетом солнечности и температуры воды [4].

В настоящей работе использовался первый вариант определения Арктической территории. Основные результаты анализа грозовых явлений выше 60° с. ш. представлены ниже.

Изменение количества грозовых дней по годам отображено в табл. 1. Максимальное количество дней с грозой выявляется на станции Радужный (Тюменская область): в 2016 г. оцениваемый показатель равен 17. Наиболее грозовым

годом можно считать 2020 (146 дней). Год с наименьшим количеством дней с грозой – 2015 (71 день). Среди Арктических станций РФ выделяются станции Игарка (скачок от 1 дня с грозой в год до 7) и Усть-Оленек (в 2020 г. там впервые за рассматриваемый период наблюдались грозы).

Распределение в наиболее грозовой год представлено на рис. 1. Максимум наблюдается в Ханты-Мансийском АО (ст. Угут) – 14 дней, минимальные значения принадлежат станциям Красноярского края, Якутии и Чукотки – не более 1 дня.

Картина за год с наименьшим числом грозовых дней иная (рис. 2). На метеостанциях Ханты-Мансийского АО, Красноярского края и Чукотского АО количество дней с грозой за весь 2015 г. составило 1. Нефтеюганск (Ханты-Мансийский АО) в данном случае показывает наибольший результат – 13 дней.

Изменение количества гроз по месяцам представлено в табл. 2. Грозовой период в среднем начинается в мае и продолжается до сентября. Отмечаются и аномалии: 2 случая грозы в марте и 2 в октябре. Абсолютный максимум дней с грозой приходится на станцию Радужный (Тюменская область) и составляет 29 соответственно. Максимум в годовой и месячной оценке приходится на одну и ту же станцию.

Таблица 1

Распределение гроз за период с 2015 по 2021 г.

Свердловская область	Бурмантово
	Алтай
	Казым
	Ларьин
	Нефтеюганск
	Угут
	Юильск
	Ныда
	Попуй
Ханты-Мансийский АО	Октябрьское
	Радужный
Ямало-Ненецкий АО	Ванжиль-Кыннак
	Байкит
Тюменская область	Бахта
	Вельмо
	Верещагино
	Верхнеимбатск
	Волочанка
	Игарка
	Кузьмовка
	Курейка
	Муторай
Красноярский край	Северо-Енисейский
	Стрелка Чуня
	Сым
	Тембенчи
	Усть-Камо
	Ярцево
Иркутская область	Наканно
	Преображенка
	Батамай
	Бердигестях
	Быков Мис
	Намцы
	Среднеколымск
	Усть-Оленек
	Анадырь
Республика Саха (Якутия)	Билибино
	Константиновская
	Танюров
Чукотский АО	

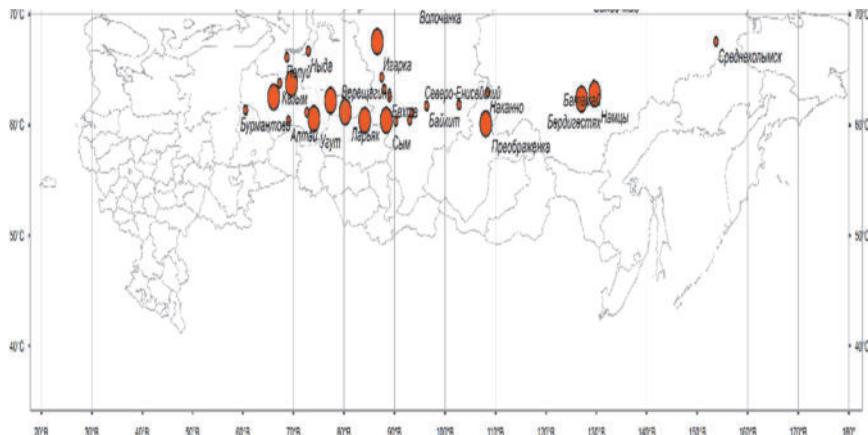


Рис. 1. Год с максимальным количеством гроз

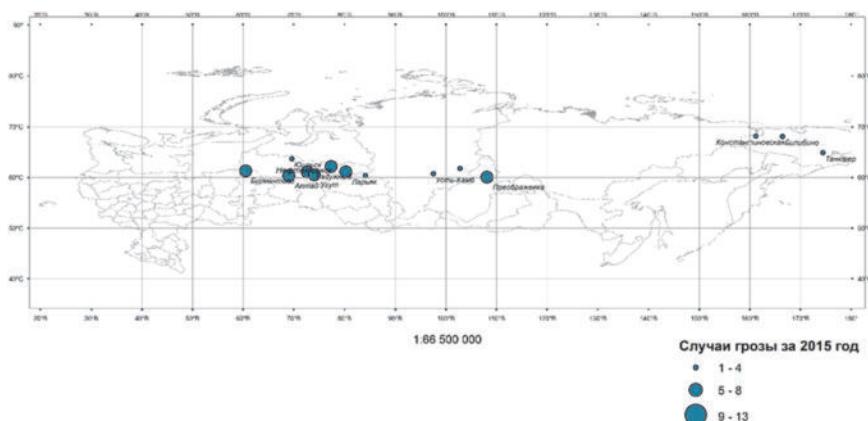


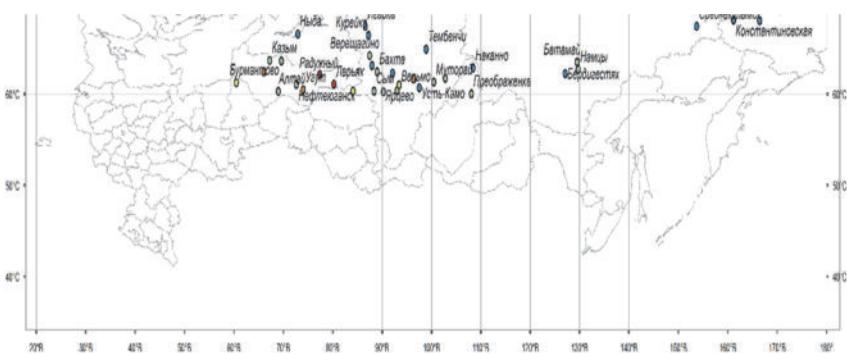
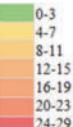
Рис. 2. Год с минимальным количеством гроз

Активная грозовая деятельность приходится на июль (рис. 3). При движении с запада на восток количество дней с грозой постепенно уменьшается. Наибольшие значения приходятся на Ханты-Мансийский автономный округ и Тюменскую область, что объясняется усилением роли циклонов в летний период и формированием штормовой погоды в этом регионе; минимальные – наблюдаются в Якутии и Чукотке. В Арктическом секторе грозовым месяцем можно считать август, что связано с более поздним прогревом подстилающей поверхности.

Таблица 2

Месячное распределение гроз за период с 2015 по 2021 г.

		янв	фев	мар	апр	май	июн	июл	авг	сен	окт	ноя	дек
Свердловская область	Бурмантово	-	-	-	-	2	9	12	2	2	-	-	-
	Алтай	-	-	-	-	2	6	13	7	12	2	-	-
	Казым	-	-	-	-	-	3	6	10	1	-	-	-
Ханты-Мансийский АО	Ларьяк	-	-	-	1	4	13	23	21	3	-	-	-
	Нефтеюганск	-	-	-	-	1	6	12	8	9	3	-	-
	Угут	-	-	-	-	2	10	19	17	8	5	1	-
	Юрльск	-	-	-	-	7	5	7	9	-	-	-	-
	Ныда	-	-	-	-	3	3	3	7	1	1	-	-
Ямало-Ненецкий АО	Попуй	-	-	-	-	-	3	-	3	2	-	-	-
	Октябрьское	-	-	-	-	2	8	18	13	1	-	-	-
Тюменская область	Радужный	-	-	1	-	-	12	29	15	3	-	-	-
	Ванкиль-Кынак	-	-	-	-	8	15	11	10	3	-	-	-
Красноярский край	Байкит	-	-	-	-	1	2	9	18	8	-	-	-
	Бахта	-	-	-	-	-	1	6	8	5	-	-	-
	Вельмо	-	-	-	-	-	6	14	6	-	-	-	-
	Верещагино	-	-	-	-	-	2	7	1	3	-	-	-
	Верхнимейбатск	-	-	-	-	1	6	2	4	2	-	-	-
	Волочанка	-	-	-	-	-	4	4	3	-	-	-	-
	Игарка	-	-	-	-	-	4	1	7	2	-	-	-
	Кузьмовка	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-
	Курейка	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
	Мугорай	-	-	-	-	2	6	6	3	-	-	-	-
	Северо-Енисейский	-	-	-	-	1	10	5	4	2	-	-	-
	Стрелка Чуя	-	-	-	-	-	5	7	3	-	-	-	-
	Сым	-	-	-	-	6	9	6	16	4	-	-	-
	Тембенчи	-	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-	-
	Усть-Камо	-	-	-	-	-	1	1	1	-	-	-	-
	Ярцево	-	-	-	-	1	5	8	7	3	-	-	-
	Накано	-	-	-	-	1	2	2	-	-	-	-	-
	Преображенка	-	-	-	-	5	13	6	13	5	-	-	-
Республика Саха (Якутия)	Батамай	-	-	-	-	-	2	4	1	-	-	-	-
	Бердигеях	-	-	1	-	1	5	3	2	-	-	-	-
	Быков Мыс	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
	Намцы	-	-	-	-	2	3	5	1	2	-	-	-
	Среднекольмск	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-
Чукотский АО	Усть-Оленек	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-
	Анадырь	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
	Билибино	-	-	-	-	4	1	-	-	-	-	-	-
	Константиновская	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-	-	-



Количество гроз в июле с 2015 по 2021 гг.

1:66 500 000

• 1-3

Рис. 3. Месяц с максимумом гроз за период с 2015 по 2021 г.

Атмосферные процессы в северных регионах, связанные с грозовой деятельностью, требуют повышенного научного внимания, т. к. данные регионы раньше прочих реагируют на климатические изменения. В течение 1936–2020 гг. повышение среднегодовой температуры составило 1,87 °С [2]. Известно, что гроза связана с наличием сильной неустойчивости стратификации воздуха при высоком влагосодержании [1; 3]. Чем выше температура воздуха, в том числе в Арктике, тем активнее происходит таяние морских льдов, освобождаются обширные водные пространства, испарение которых является причиной формирования грозовых облаков. В ходе исследования особенно выделяются метеостанции Тюменской области. Известно, что регион обладает протяженной лесной и болотной зонами, избыточным увлажнением, что является фактором формирования грозовых облаков, однако, необходим более подробный анализ циклогенеза территории. Для более полной оценки необходимо увеличивать временной ряд и включать дополнительные характеристики грозы, ведь результаты работы могут быть интересны не только в климатологии и метеорологии, но и авиационному, морскому транспорту, при строительстве и во многих других сферах, действующих в северных районах.

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

Список литературы

1. Горбатенко В. П. Синоптические условия образования и развития гроз над территорией Западной Сибири и Казахстана // Вестник Томского государственного университета. 2001. № 274. С. 148–154
2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М. : Минприроды России ; МГУ им. М. В. Ломоносова, 2021. 864 с
3. Тарасов Л. В. Ветры и грозы в атмосфере Земли : учеб. пособие. Долгопрудный : Интеллект ИД, 2011.
4. Arctic monitoring & assessment programme, maps & graphics. – URL: <https://www.amap.no/documents/doc/arctic-boundaries-physical/380> (дата обращения: 28.03.2022)
5. Kępski D., Kubicki M. Thunderstorm activity at high latitudes observed at manned WMO weather stations // International Journal of Climatology. 2022. Р. 1–23.

УДК 282.247.11

Параметризация наводнений в устье Печоры посредством комбинирования стационарного и спутникового мониторинга

Д. В. Магрицкий (Magdima@yandex.ru)¹, К. И. Головнин (Golovnin98@bk.ru)²,
Л. Ю. Севастьянова (Luizabon@yandex.ru)³

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

²Институт водных проблем РАН, Москва

³Объединенная гидрометеорологическая станция «Нарьян-Мар», Нарьян-Мар

Аннотация. На основе данных сетевых наблюдений за уровнями и расходами воды на гидрологических постах на устьевом участке р. Печоры, включая е дельту (за весь период и до 2019–2021 гг.), уникальных сведений о произошедших в прошлом здесь речных наводнениях, по результатам дешифрирования спутниковых снимков (в оптическом диапазоне и радиолокационных), начиная с 1991 г. получены новые данные о характере развития затоплений в районе населенных пунктов, включая г. Нарьян-Мар, во время прохождения весеннего половодья. Рассмотрены многолетний и внутригодовой аспекты динамики этих опасных событий и их основных характеристик (повторяемости, продолжительности, глубины и площади), получены сведения о границах зон затопления, условий перехода их в категорию наводнений. Обоснованы связи между характеристиками затоплений, получаемых с постов и со спутниковых снимков.

Ключевые слова: Печора, устье, пост, уровень воды, спутниковый снимок, затопление

Устья рек имеют не только очевидные географические и экономические преимущества, но также большой перечень опасных гидрологических явлений. Среди всех опасных явлений наводнения формируют наибольшие ущербы. Арктические речные устья не исключение, хотя здесь некоторые опасные гидрологические явления не имеют такой интенсивности как в южных широтах. К таким объектам можно отнести устье р. Печоры, где г. Нарьян-Мар не раз подвергался затоплениям речными водами. Проводимые здесь противопаводковые мероприятия, в том числе оперативного характера, основываются, прежде всего, на материалах наземного мониторинга. Но характер таких данных – их территориальная ограниченность. По сути, они дают представление лишь о том, что происходит на участке поста. Тогда как данные спутникового мониторинга показывают намного более расширенную пространственную картину развития процесса. Правда и у них есть ограничения, связанные с количеством пролетов спутника и сделанных снимков, а также из-за облачности. Тем не менее, это очень ценный и пока мало используемый источник информации. Одной из причин этого служит дефицит научно-исследовательских работ по увязыванию данных наземного и спутникового мониторинга в конкретных районах. В этой работе такая попытка в отношении устья Печоры и часто возникающих здесь наводнений была сделана. Основные результаты приведены.

Общие сведения об устье р. Печоры и ее гидрологическом режиме

Устьевая область Печоры (УОП) замыкает бассейн одноименной реки при ее впадении в Печорскую губу Баренцева моря. Она полностью расположена в

пределах Ненецкого автономного округа со столицей в г. Нарьян-Маре. УОП по своему морфологическому строению и по классификации В. Н. Михайлова [4], относится к эстуарно-дельтовому типу. УОП состоит из сложных по своему строению устьевого участка и устьевого взморья. Площадь всей УОП 10700 км² [4]. Верхней границей устьевого участка служит устье притока – реки Сулы, куда могут проникать со стороны моря нагонные и приливные колебания уровней. Длина устьевого участка 190 км; в его состав входят придельтовый отрезок и дельта. На придельтом отрезке, между верхней границей УОП и вершиной дельты, р. Печора имеет широкую пойму с многочисленными протоками и озерами, разветвленное русло с большим разветвлением между населенными пунктами Великовисочное и Оксине, где р. Печора разделяется на, так называемые, р. Мал. Печора и р. Бол. Печора. По сути, это русловые рукава. Дельта Печоры относится к дельтам выполнения лиманов и лагун; она многорукавная. Вершина дельты (ВД) – это узел разделения реки уже на дельтовые рукава Большая Печора (правый) и Малая Печора (левый) у с. Большая Сопка. Малая Печора, в свою очередь, разделяется на несколько крупных рукавов и множество небольших. Большая Печора (основной рукав) имеет широкое, но извилистое, с некоторыми разветвлениями русло и основной узел разветвления недалеко от Печорской губы. Длина дельты 120 км, площадь 2600 км², согласно данным из [1], а по данным из [4] и с учетом оз. Голодная губа – площадь 3250 км². На долю суши в межень приходится около 70 % территории дельты [2]. Морской край дельты (МКД) сильно расчлененный, его длина 60 км.

Исходные материалы

В качестве исходных материалов при решении задач исследования были использованы:

- данные наземных гидрологических наблюдений – на гидрологических постах (за уровнями и расходами воды, ледовыми явлениями вплоть до 2019–2021 г.) и по итогам экспедиционных гидрологических изысканий. В устье Печоры основной стоковый пост – это Оксине ($F=312000 \text{ км}^2$; в 141 км от моря), который функционирует с 1916 г. Другие главные посты в устье Печоры – урвенные. Это Нарьян-Мар (основной пост в дельте, в 100 км от залива), Андег (в 75 км), Осколково (53 км) и морские посты. А на придельтом участке еще важный пост – Ермицы. Пост Красное (в 62 км) был закрыт в 1987 г.;

- сведения о критических высотных отметках, выше которых начинается затопление поймы, сельхозугодий, дорог, хозяйственных объектов и возникает угроза для здоровья и жизни людей, возможен экологический ущерб. В основном они относятся к створам гидрологических постов;

- топокарты и материалы геодезической съемки на участках потенциального затопления речными водами;

- открытые сведения и отчеты о зафиксированных в прошлом опасных гидрологических событиях с их описанием и количественными данными. Так, часть сведений по наводнениям в устье Печоры были взяты из базы данных о разных опасных гидрологических событиях в устьях рек европейской части России, начиная с 1900 до 2014 г., и даже раньше. Создатель БД – Магрицкий Д. В. и др.

Это базы «Наводнения в устьях рек Европейской территории России» (Свидетельство о регистрации № 2013620332 от 21 февраля 2013 г.) и «Опасные гидрологические явления на морских побережьях Европейской России» (№ 2015620918 от 16 июня 2015 г.) [3]. В ней есть материалы и по устью р. Печоры, например, об около 34 речном наводнении в период с 1912 по 2015 г., о 12 умеренно опасных и опасных случаях с уровнями воды в реке и рукавах ниже критического значения [8];

– опубликованные результаты похожих исследований – по рассматриваемому объекту и теме;

– материалы спутниковой съемки на период развития опасного гидрологического события, в частности затопления суши и населенных пунктов. При работе с данными спутникового мониторинга были использованы только снимки съемочных систем Thematic Mapper (TM) Landsat-5, Operational Land Viewer (OLI) Landsat-8, Multispectral Imager (MSI) Sentinel-2, а также снимки, полученные радиолокатором с синтезированной апертурой со спутника Sentinel-1. В качестве источников для получения космических снимков послужили серверы Earth Observation System (EOS, приложение Land Viewer), Earth Explorer USGS. Радиолокационные снимки Sentinel-1 получены с ресурса Copernicus Open Access Hub. Также для доступа к снимкам и осуществления некоторых этапов их тематической обработки использовалась система Google Earth Engine (GEE).

Наводнения в устье Печоры. Результаты современной оценки

Стоковые и стоково-заторные затопления, включая опасные события, на придельтовом участке и в дельте р. Печоры происходили в прошлом и продолжают случаться и в новых гидроклиматических и социально-экономических условиях (рис. 1). Пойма вблизи постов затапливается практически ежегодно, за исключением участка поста Нарьян-Мара, где повторяемость составила 84 % лет за 1936–2021 гг. (табл. 1). Превышение отметки неблагоприятного явления (НЯ) довольно случается в среднем в 1/4–1/2 числе случаев с самыми низкими показателями на посту Нарьян-Мар (24 %) и наиболее высокими на посту Осколково (68 %). Случаев превышения отметки опасного явления (ОЯ) <10–15 %. Хорошо видно, что частота превышения НЯ и ОЯ возрастает к МКД, несмотря на распластывание волны половодья. Возможно, влияет (в этом же направлении) снижение высотных отметок местности и усиление влияния подпорных явлений со стороны моря. Половодные подъемы уровня ниже Нарьян-Мара уменьшаются вследствие распластывания половодной волны и в процентном выражении составляют: 85 % – в 90 км, 60 % – в 70 км, 50 % – в 50 км, 25 % – в 7 км от устьевого створа.

В многолетнем плане повторяемость затоплений (в силу изменений максимального уровня половодья) практически не меняется. Все тренды (и убывающие для постов Ермицы, Нарьян-Мар, Андег, и возрастающие для поста Оксино, и нейтральный для поста Осколково) статистически незначимые по критерию Спирмена (при уровне значимости 5 %). На разностных интегральных кривых максимальных уровней воды была обнаружена схожая (по разным постам) цикличность в многолетних колебаниях максимальных уровней с примерной продолжительностью самых долгопериодных циклов в 25 лет!

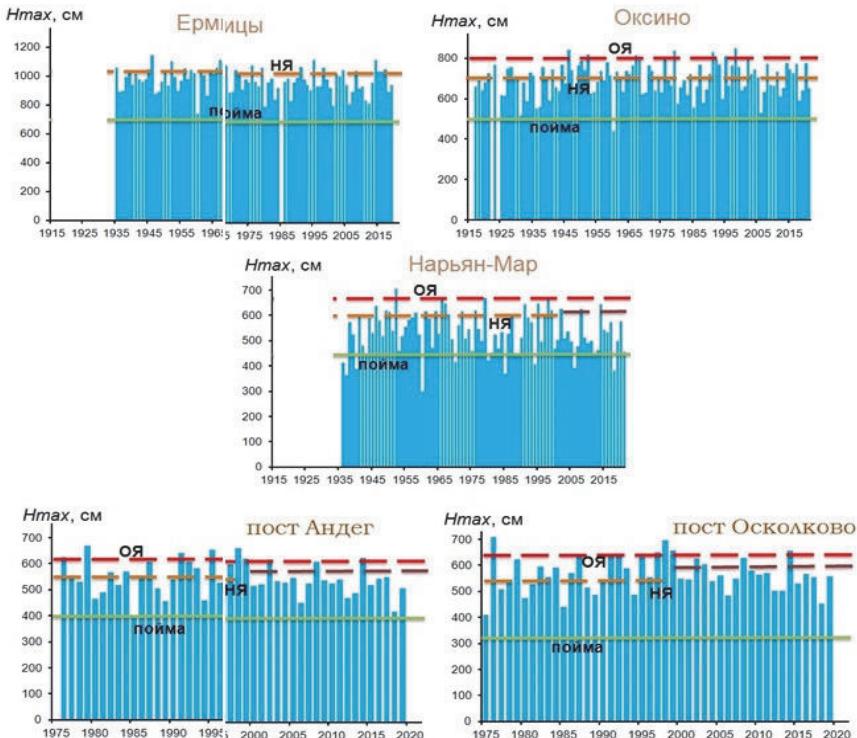


Рис. 1. Многолетние изменения максимальных за год уровней воды на постах в устье Печоры с указанием высотных отметок затопления поймы, НЯ и ОЯ

Таблица 1

Характеристики превышения уровня половодья высотами отмечек поймы, НЯ и ОЯ

Участок	Посты	Весь период			1976–2021 гг.		
		Пойма	НЯ	ОЯ	Пойма	НЯ	ОЯ
Повторяемость (%)							
Придель-толовый	Ермицы	100	26		100	26	
	Оксино	99	48/44*	7,5	100	50/43*	8,7
Дельта	Нарьян-Мар	84	24/23*	1	83	20/17*	2
	Андег				100	48/39*	11
	Осколково				100	68/43*	14
Продолжительность** (сут.)							
Придель-толовый	Ермицы	30/52***	4,5/12***	-	32/52***	5/9***	-
	Оксино	22/43***	6,5/19***	-	23/43***	7,1/19***	-
Дельта	Нарьян-Мар			-	9/28***	2,7/4***	-
	Андег				20/39***	3,9/9***	-
	Осколково				50/98***	4,8/12***	-

Окончание табл. 1

Участок	Посты	Весь период			1976–2021 гг.		
		Пойма	НЯ	ОЯ	Пойма	НЯ	ОЯ
Глубина затопления** (м)							
Придель- товый	Ермицы	2,6/4,4***	0,4/1,1***	-	2,5/4,3***	0,4/0,95***	-
	Оксино	1,9/3,5***	0,6/1,5***	0,3/0,5***	2,0/3,5***	0,7/1,5***	0,3/0,5***
Дельта	Нарьян-Мар	1,0/2,6***	0,3/1,1***	0,2/0,4***	1,0/2,2***	0,4/0,7***	0,0
	Андея				1,5/2,7***		
	Осколково				2,4/3,9***		

Примечание. *с учетом изменения критической отметки на более высокую (с 1998 г.), **без учета нулевых значений, ***в знаменателе – максимальная

Продолжительность затопления, наоборот, испытала значительные многолетние изменения (рис. 2): причем – повсеместный рост в отношении затопления поймы, рост в отношении НЯ, но только на постах на придельтовом участке (как за весь период, так и за единый период с 1976 г.), и уменьшение по НЯ в дельте. Возможно, объяснение в увеличении объема стока половодья и соответствующих уровней на его подъеме и спаде. Средняя продолжительность затопления поймы составляет 20–50 сут., тогда как максимальная может достигать 1,5–2,5 мес. Длительность неблагоприятных затоплений существенно меньше – в среднем до 1 недели, максимальная – 1,5–3 недели. Связь между максимальными за год уровнями и продолжительностью затопления существует, но не тесная, за исключением поста Нарьян-Мар. На характер связи заметное влияние оказывают условия, сопровождавшие формирование H_{max} – только при прохождении максимальных расходов воды, или им сопутствовали еще ледовые явления и особенно заторы льда. Поэтому, если ими и пользоваться, то смотреть на верхнюю огибающую, как максимально возможную продолжительность при данном уровне.

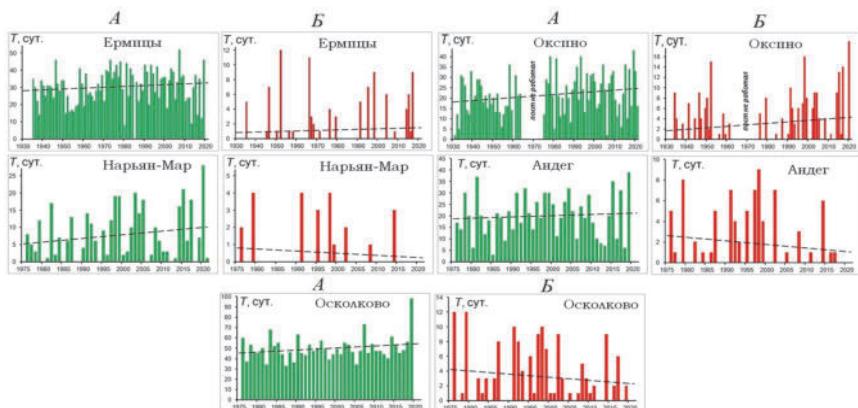


Рис. 2. Многолетние изменения продолжительности затопления поймы (A) и превышения уровнями половодья отметки НЯ (Б) с линейными трендами за период 1976–2019 гг. на постах в устье Печоры

Глубина затопления поймы варьирует от 1 до 2,5 м, максимальная – до 4,5 м (см. табл. 1). Высота превышения НЯ составила 0,3–0,6 м, максимальная до 1,5 м.

Максимальные уровни весеннего половодья, как и связанные с ними опасные затопления, обычно наблюдаются во второй-третьей декадах мая и первой декаде июня – 78 % для Оксино и 66 % для Ермицы (рис. 3). Причем на посту Оксино более неравномерное распределение максимумов.

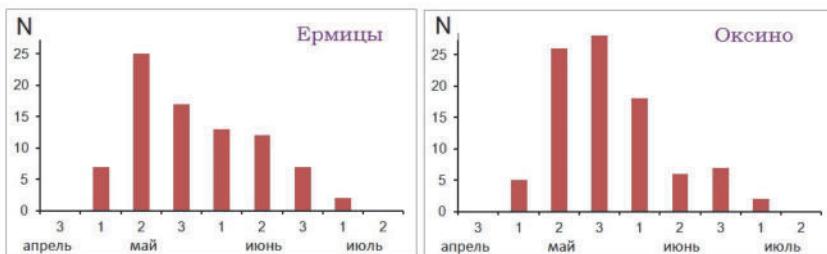


Рис. 3. Внутригодовое (по декадам весенне-летних месяцев) распределение максимальных за год уровней воды

В многолетнем масштабе наблюдаются изменения максимальных подъемов уровней воды и связанных с ними затоплений, как в силу изменений максимальных расходов воды, так и ледовых условий, в частности повторяемости и продолжительности заторов льда. Максимальные уровни наблюдаются все раньше, максимальные за год расходы воды либо почти не меняются, либо все-таки (если верить только данным более надежного поста Усть-Цильма) снижаются, тогда как объем стока половодья, наоборот, увеличивается. Что объясняет увеличение продолжительности затопления. Как следует из рис. 4 ситуация с заторами льда несколько ухудшается, подтверждая выводы из работы [7].

При сопоставлении данных с постов и сведений по факту наводнений, в частности для Нарьян-Мара, по которому больше информации, подтвердились сведения из работы [5], в которой сообщалось, что почти каждый второй год город подвергался затоплениям, и критическим уровнем были 550 см (их обеспеченность 40 %). По-видимому, для отдельных районов г. Нарьян-Мара (в прибрежной припойменной зоне) эта отметка сохранилась и в настоящее время, тогда как опасные и особо опасные затопления случаются при уровнях выше 600–620 см ($p=20\text{--}25\%$) и 670 см ($p < 5\%$) над нулем поста.

Максимальные уровни и затопления в устье Печоры наблюдаются как во время подъема первой волны половодья и при ледоходе/заторах льда, так и при открытом русле – во время так называемой усинской воды.

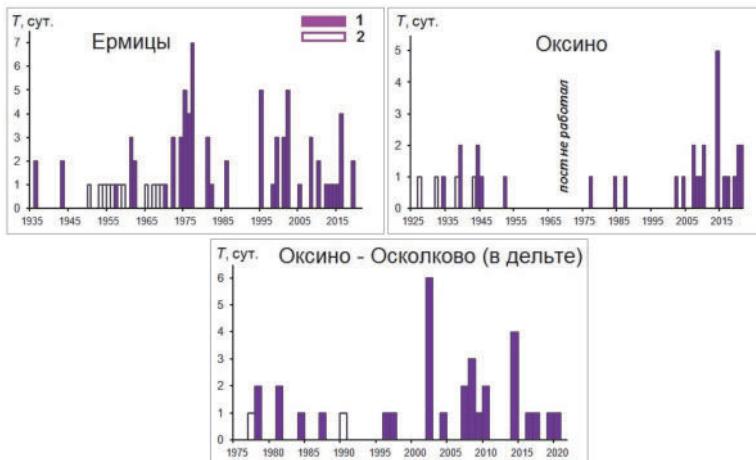


Рис. 4. Продолжительность и повторяемость заторов льда ниже постов.
1 – известна продолжительность затора льда, 2 – известно лишь о факте заторообразования

По результатам обработки космических снимков (за период с 1991 г.) проведено исследование зависимостей выявленных по снимкам характеристик затоплений и данных гидрометрических наблюдений как для ключевых участков в целом (которые подвергаются затоплениям наиболее часто и в значительной степени), так и для отдельных объектов внутри них. Был детально изучен сам процесс развития и завершения затоплений в разных секторах устья Печоры и при разном состоянии реки. При этом рассматривалось затопление не только освоенных территорий, но и участков русла и низкой поймы, которые в межень осыхают. Также были выделены объекты различного типа, имеющиеся в базе пространственных данных Нарьян-Мара и находящиеся в зонах затопления, наибольших по площади за рассмотренные даты, определены их суммарные длины и площади, проведена оценка полученных результатов. При этом рассматривались затопления на следующих участках: в окрестностях населенных пунктов: г. Нарьян-Мар, пос. Искателей, пос. Тельвиска и дер. Макарово площадью 469 км²; с. Великовисочное и дер. Лабожское площадью 307 км². В целом полученные с использованием материалов дистанционного зондирования данные достаточно четко согласуются с данными наземных наблюдений.

Для области в окрестностях Нарьян-Мара коэффициент корреляции между площадями зон затоплений и уровнями в соответствующие сутки $r = 0,96$ (рис. 5). При этом важно заметить, что при включении в расчет только полученных по оптическим снимкам данных он равен 0,97, а только по радиолокационным – 0,94. При анализе полученных для второй области результатов было установлено, что $r = 0,91$. Такие небольшие различия подтверждают возможность совместного использования снимков различных типов для мониторинга затоплений, их временной изменчивости.

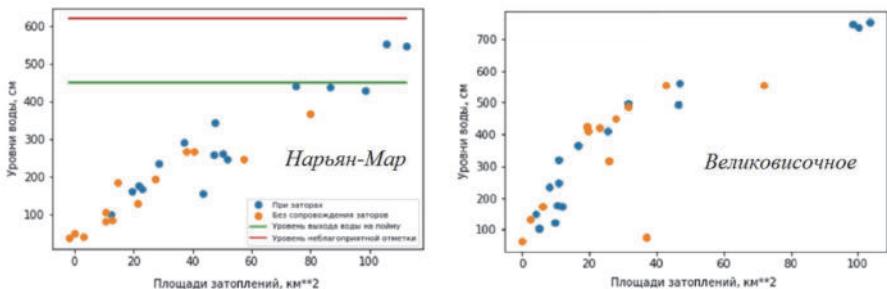


Рис. 5. График связи площадей затоплений, определенных по спутниковым снимкам, со значениями уровня воды по данным постов

Также было проанализировано возможное влияние заторов на величину затоплений. Хотя используемые снимки получены на различные этапы развития половодья, можно видеть, что, как для первой, так и для второй области наибольшие по площади затопления наблюдались в годы с заторными явлениями на различных участках в устьевой области (рис. 6). Поэтому в связи с увеличением частоты и продолжительности заторных явлений охват подверженных затоплению территорий может возрасти.

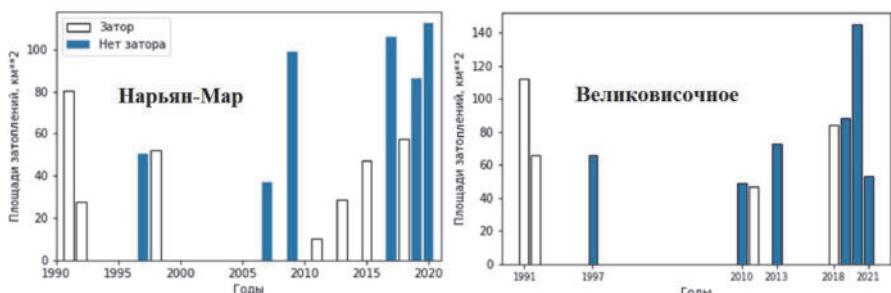


Рис. 6. Наибольшие из зафиксированных по космическим снимкам площади затоплений у постов в годы с заторными явлениями и без них

На все даты прохождения половодья и развития затоплений были установлены закономерности протекания этих процессов для упомянутых ключевых участков. Пример этих схем приведен на рис. 7.

Выводы

По итогам выполнения работы основная цель – аprobация на устьевой участок р. Печоры подхода, основанного на комбинировании данных наземного и спутникового мониторинга для определения характеристик опасных гидрологических явлений (затоплений, ледовых явлений), анализа их многолетней и сезонной изменчивости для последующего прогноза и реконструкции подобных событий была во многом выполнена.

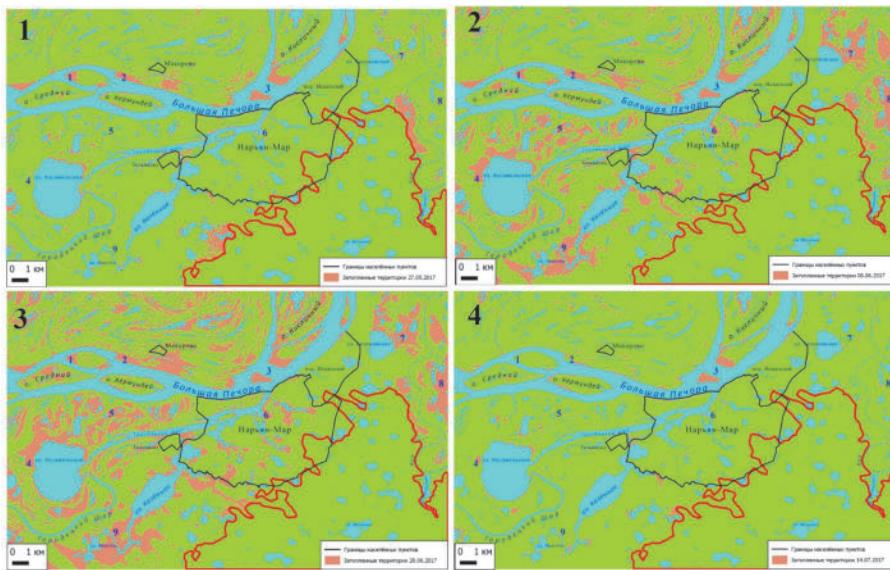


Рис. 7. Схема развития затопления в районе г. Нарьян-Мар в половодье 2017 г. По состоянию на: 1 – 27.05.2017 г., 2 – 08.06.2017 г., 3 – 20.06.2017 г., 4 – 14.07.2017 г.

Затопленные территории показаны коричневым цветом

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы (I.10, ЦИТИС 121051400038-1) и Научной школы МГУ – Климат и окружающая среда.

Список литературы

1. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / под ред. Н. И. Алексеевского. М. : ГЕОС, 2007. 585 с.
2. Лупачев Ю. В. Гидрологические условия устьевой области Печоры и их возможные изменения при изъятии части стока из бассейна // Труды ГОИН. 1979. Вып. 143. С. 49–68.
3. Магрицкий Д. В., Алексеевский Н. И., Юмина Н. М., Ретеюм К. Ф. Обеспечение хозяйственной деятельности данными по условиям возникновения и основным характеристикам наводнений // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата : материалы конф. Минск, 2015. С. 191–193.
4. Михайлов В. Н. Устья рек России и сопредельных территорий: прошлое, настоящее и будущее. М. : ГЕОС, 1997. 413 с.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л. : Гидрометеоиздат, 1972. 520 с.
6. Справочно-аналитический обзор гидрологического режима устьевой области реки Печора. М. ; Иваново : ПресСто, 2021. 152 с.
7. Сумачев А. Э., Баницкова Л. С. Ледовый режим реки Печоры в современных климатических условиях и принципы прогнозирования высшего уровня за период весеннего ледохода // Успехи современного естествознания. 2021. № 10. С. 75–80.
8. Magritsky D., Lebedeva S. & Skripnik E. Hydrological hazards at mouths of the Northern Dvina and the Pechora rivers, Russian Federation // Nat Hazards. 2017. Vol. 88, N 1. P. 149–171.

УДК 551.583+504.7(476)

Чрезвычайные ситуации метеорологического характера на территории Беларуси

М. В. Медведько (marry_medvedko25@mail.ru), Ю. А. Гледко (gledko74@mail.ru)

Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты анализа чрезвычайных ситуаций (ЧС) метеорологического характера для г. Минска за период 2008–2021 гг. на основе данных МЧС Республики Беларусь. За исследуемый период в г. Минске было зафиксировано 19 ЧС метеорологического характера, связанных с разными видами опасных метеорологических явлений. Как показывает статистика, именно ЧС метеорологического характера среди всех видов ЧС природного характера являются лидирующими по числу возникновения.

Ключевые слова: опасные метеорологические явления, чрезвычайные ситуации, изменение климата, социальный ущерб, экономический ущерб.

В Шестом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) [9] прогнозируется, что в ближайшие десятилетия изменения климата будут усиливаться во всех регионах земного шара. При глобальном потеплении на $1,5^{\circ}\text{C}$ будет происходить усиление волн жары, удлинение теплых сезонов, сокращение холодных сезонов. В докладе говорится о том, что при глобальном потеплении на 2°C экстремальные показатели жары будут чаще достигать критических порогов толерантности для сельского хозяйства и здоровья. Изменение климата влечет за собой также изменения влажности и сухости, ветров, снега и льда, прибрежных районов и океанов. Изменение климата усиливает круговорот воды в природе. Это влечет за собой более интенсивные осадки и связанные с ними наводнения, а также более интенсивную засуху во многих регионах. Изменение климата влияет на характер выпадения осадков. В высоких широтах количество осадков, вероятно, увеличится, в то время как в значительной части субтропиков прогнозируется их уменьшение. Для городов некоторые аспекты изменения климата могут усиливаться, включая жару (поскольку городские районы обычно теплее, чем их окрестности), наводнения в результате обильных осадков и повышение уровня моря в прибрежных городах.

При этом глобальные процессы изменения климата имеют свои региональные проявления. Так, по данным Белгидромета, со второй половины 1970-х годов скорость роста температуры в Беларуси составила $0,6$ градуса за 10 лет. Данные показатели в 3,5 раза превышают скорость роста температуры воздуха над сущей северного полушария. В целом растут максимумы температур, изменяется продолжительность сезонов года – увеличивается продолжительность лета и сокращается зима. Также увеличивается продолжительность вегетационного периода и сокращается отопительный период. Что касается изменения характера выпадения осадков на территории Беларуси, то в холодный период года их сумма растет, а в отдельные месяцы теплого периода года – сокращается, что наряду с ростом температуры воздуха приводит к увеличению засушливых условий.

На фоне вышеуказанных тенденций возрастаёт опасность возникновения природных чрезвычайных ситуаций (ЧС), которые могут быть геологическими, метеорологическими, гидрологическими и др. В данной статье объектом исследования выступают ЧС метеорологического характера.

На территории Республики Беларусь уделяется значительное внимание изучению ЧС природного характера и их влиянию на различные виды экономической деятельности. Особое внимание изучению ЧС природного характера уделяется учеными из Белорусского государственного экономического университета. В частности, в 2018 г. О. Н. Лопачук было дано обоснование методических подходов к оценке ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Республике Беларусь, а также произведена экономическая оценка последствий ЧС природного характера в лесном хозяйстве и для промышленности [2–4]. Л. А. Самусенко в 2017 г. опубликовала статью «Чрезвычайная ситуация природного и техногенного характера: проблемы правового определения» [5]. Ю. А. Гледко и А. Г. Гончар опубликовали работу «Региональное распределение ущерба последствий опасных метеорологических явлений на территории Беларуси», в которой отмечено, что за период 1991–2011 гг. выросли потери в экономике страны по гидрометеорологическим причинам, что вызывает настоятельную необходимость поворота гидрометеорологической службы страны в сторону научно-прикладных исследований в области экономической метеорологии [1].

Источниками ЧС метеорологического характера являются опасные метеорологические явления (ОЯ) – метеорологические, гидрологические, агрометеорологические явления, которые по своей интенсивности, продолжительности, времени возникновения и площади распространения могут привести или привели к значительным потерям в экономике и создают угрозу здоровью и жизни человека [6], а именно: очень сильный ветер, в том числе шквалы и смерчи; очень сильный дождь; очень сильный ливень; продолжительный очень сильный дождь; очень сильный снег; сильные метели; сильный гололед; сильное налипание мокрого снега; сильные сложные отложения (слой льда, изморози и мокрого снега); чрезвычайная пожарная опасность; крупный град; заморозки; сильная пыльная буря; очень сильный мороз; очень сильная жара; сильные туманы [7].

За период 2008–2021 гг. в г. Минске было зафиксировано 19 ЧС метеорологического характера, связанных с разными видами ОЯ. Как показывает статистика ЧС на территории РБ за период 2009–2021 гг., именно ЧС метеорологического характера среди всех видов ЧС природного характера являются лидирующими по числу возникновения (табл. 1).

ЧС ситуации метеорологического характера на территории г. Минска за рассматриваемый период были связаны со следующими метеорологическими явлениями: сильный ветер, в том числе шквалы и смерчи – максимальная скорость ветра 16–25 м/с и более; очень сильный снегопад – количество осадков 20 мм и более в течение 12 ч и менее; очень сильный дождь – количество осадков 50 мм и более в течение 12 ч и менее; количество атмосферных осадков не менее 100 мм за период более 12 ч, но менее 48 ч. [7].

Таблица 1

Отношение ЧС метеорологического характера к ЧС природного характера за период 2009–2021 гг. на территории РБ, %, составлено авторами по [8]

Год	Количество ЧС метеорологического характера	Количество ЧС природного характера	Отношение ЧС метеорологических к ЧС природного характера, %
2009	7	24	29,2
2010	5	8	62,5
2011	9	15	60,0
2012	6	10	60,0
2013	4	6	66,7
2014	1	2	50,0
2015	1	9	11,1
2016	6	8	75,0
2017	3	5	60,0
2018	3	5	60,0
2019	8	11	72,7
2020	9	15	60,0
2021	6	14	42,9

В количественном отношении, по числу ЧС на первом месте выступают ЧС, связанные с очень сильным ветром, шквалом и смерчем, количество случаев которых составило 15 или 76 % от общего числа ЧС метеорологического характера (рис. 1). За исследуемый период ЧС из-за очень сильного снегопада наблюдалась один раз в 2013 г. В свою очередь ЧС, связанные с очень сильным дождем, были зафиксированы 3 раза в 2009 г.

В результате рассмотренных ЧС, г. Минску был нанесен социальный и экономический ущербы. По данным МЧС, суммарный экономический ущерб за период 2008–2021 гг. в г. Минске составил около 350 тыс. бел. руб., или 140 тыс. долл. Наибольший экономический ущерб принесли сильные дожди (рис. 2).

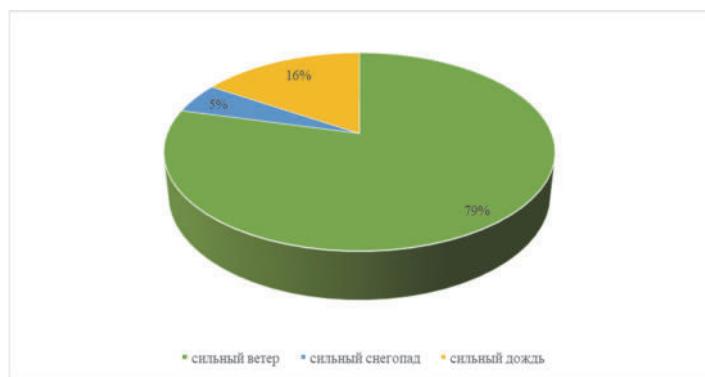


Рис. 1. ЧС метеорологического характера по видам за период 2008–2021 гг. в г. Минске, составлено авторами по [8]

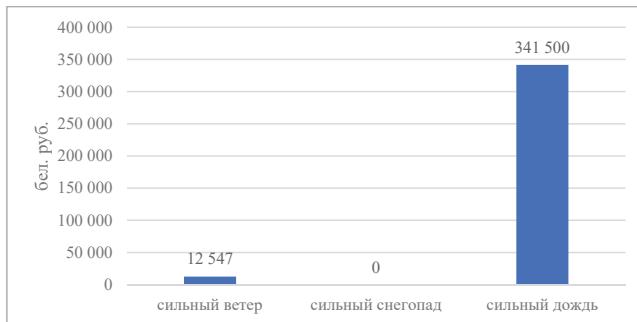


Рис. 2. Экономический ущерб, бел. руб., составлено авторами по [8]

В результате рассмотренных ЧС метеорологического характера всего было повреждено 532 единицы техники, 4 единицы сооружений, 293 здания, травмировано и ранено 28 человек.

В будущем, согласно прогнозам, ожидается продолжение вышеуказанных тенденций. Температуры воздуха будут расти и к концу столетия на территории Беларуси среднегодовые температуры воздуха могут достигать отметки плюс 10–12 градусов. Изменения климата повлияют на окружающую среду, отрасли экономики и здоровье населения, в связи с этим, важно уделять большое внимание оценке рисков от изменения климата, разрабатывать стратегии по адаптации экономики, окружающей среды и населения.

Список литературы

1. Гледко Ю. А., Гончар А. Г. Региональное распределение ущерба последствий опасных метеорологических явлений на территории Беларусь / УО «Брест. гос. техн. ун-т»; под ред. А. А. Волчека [и др.]. // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания : науч. ст. Междунар. науч.-практ. конф., Брест 23–25 апр. 2014 г. : в 4 ч. Брест, 2014. Ч. 2. С. 107–112.
2. Лопачук О. Н. Обоснование методических подходов к оценке ущерба от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Республике Беларусь // Труды БГЭУ. 2018. Вып.11.С. 265–271.
3. Лопачук, О. Н. Экономическая оценка последствий чрезвычайных ситуаций природного характера в лесном хозяйстве // Научные труды Белорусского государственного экономического университета. Минск : БГЭУ, 2020. Вып. 13. С. 344–350.
4. Лопачук О. Н., Лысенкова М. В. Экономическая оценка ущерба от чрезвычайных ситуаций в организациях промышленности: методические и прикладные аспекты // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларусь, 2018. Т. 2, № 4. С. 540–548.
5. Самусенок Л. А. Чрезвычайная ситуация природного и техногенного характера: проблемы правового определения. София. 2017. № 1. С. 72–77.
6. Стихийные гидрометеорологические явления на территории Беларусь: Справочник / М-во природ. ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь ; под общ. ред. М. А. Гольберга. Мин. : Белорус. науч.-исслед. центр экологии, 2002. 132 с.
7. Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций. Общие положения. Порядок функционирования системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций. URL: <https://mchs.gov.by/upload/iblock/c3b/c3ba9d2321e33b9821a0e852ebb2e498.pdf> (дата обращения: 21.10.2022)
8. Сведения о чрезвычайных ситуациях. URL: <https://mchs.gov.by/ministerstvo/statistika/svedeniya-o-chs/>. (дата обращения: 18.10.2022)
9. Шестой оценочный доклад МГЭИК: воздействие, адаптация и уязвимость. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (дата обращения: 20.10.2022)

УДК 551.515

Сезонный ход опасных метеорологических явлений на территории аэропорта Гумрак

А. С. Нагуманова (alena.nagumanova@mail.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва

Аннотация. Метеорологическая информация, предназначенная для авиационных пользователей – это сведения о фактическом состоянии погоды, опасных метеорологических явлениях погоды, авиационные прогнозы погоды. Она должна быть своевременной, а также максимально краткой. Для получения данных о фактическом состоянии погоды на аэродромах гражданской авиации проводят метеорологические, аэрологические, а также радиолокационные метеорологические наблюдения. Наиболее опасными явлениями погоды при полете по маршруту являются грозы, град. Посадка воздушных судов может вызывать сложность при ухудшении горизонтальной видимости при туманах, дымках и пыльных бурях. Интенсивные ливневые осадки в сочетании с порывами ветра могут вызывать дополнительные трудности для взлета и посадки воздушных судов. В статье изучается и анализируется повторяемость опасных явлений погоды для авиации на территории международного аэропорта Гумрак в г. Волгограде с 2016 по 2020 г.

Ключевые слова: авиационная метеорология, опасные явления, осадки, грозы, пыльные бури.

Волгоградская область находится на юго-востоке европейской части России. На севере соседствует с Саратовской, на северо-западе – с Воронежской, на западе – с Ростовской областями. На юге и юго-востоке соседями являются Республика Калмыкия и Астраханская область, а на востоке – Казахстан [1].

Климат умеренный континентальный. В районе Волгограда преобладают воздушные континентальные массы умеренных широт (77 %), океанское влияние составляет 11 %, арктическое – 4 %, тропическое – 7 %. Вследствие этого характерной является солнечная сухая погода – жаркая летом и холодная зимой.

По данным метеостанции в Гумраке (рис. 1), расположенной на плато (+141 м), температура воздуха составляет за год плюс 6,8° Цельсия. Средняя температура января: минус 9,9 °C; июля: плюс 23,4 °C. Абсолютный минимум: минус 35 °C; абсолютный максимум: плюс 44 °C. Длительность безморозного периода составляет 180 дней.

Более отличительной характерной чертой осадков считается их преобладание в летнее время года. Наибольшее число осадков приходится на июнь, что сопряжено с отличительными чертами циркуляции атмосферы и некоторой активацией холодных фронтов атлантических циклонов. К началу осени сумма осадков уменьшается, увеличиваясь в завершении осени, а также в зимнее время, а меньше всего их выпадает весной (в марте и апреле) [2].

Осадки различных видов проявляют разное воздействие на работу авиации.

Обложной дождь прослеживается, как правило, в области шириной приблизительно 300 км. При таких осадках видимость уменьшается, доходя в некоторых случаях вплоть до 1 км. Для того чтобы исключить слепой полет, лететь требуется на высоте 200–300 км.

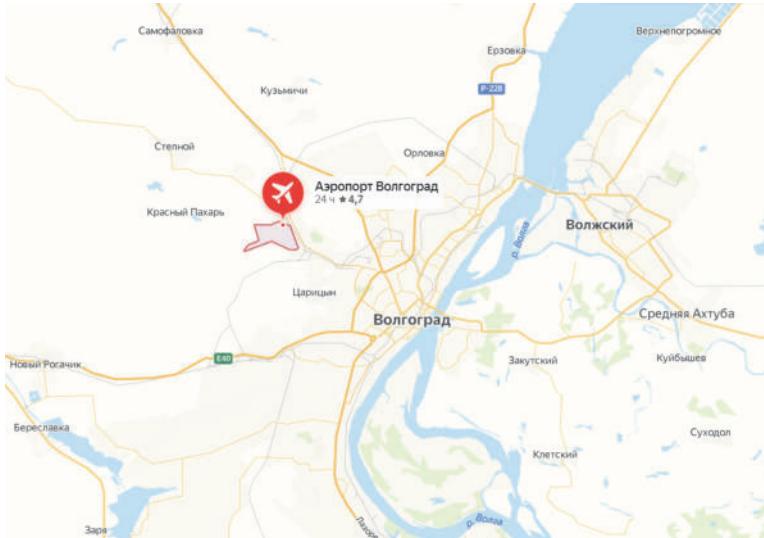


Рис. 1. Расположение аэропорта Гумрак

Обложные снегопады еще больше усложняют перелет.

Преградой к пробиванию области обложных осадков считается обледенение. Оно наступает, когда воздушное судно попадает в зону переохлажденного дождя. Наличие мокрого снега в переохлажденном дожде еще больше повышает угрозу обледенения.

Морось также ухудшает видимость, зачастую еще больше, чем обложной дождь. В некоторых случаях моросящий дождь сопровождается туманом и перелет может быть неосуществим. Область моросящего дождя зачастую бывает существенно шире области обложного дождя. При слабом моросящем дожде полет вероятен, однако в данном случае бывают низкие сплошные слоистые облака высотой 300–600 м. Моросящий дождь создает угрозу обледенения при инверсии с переходом температуре через 0 °C и при облачном слое выше слоя инверсии.

Таким образом, область с низкой облачностью, переходящей в туман, а также моросящим дождем создает условия полета наиболее серьезными, чем зона обложного дождя.

Для анализа были использованы следующие группы опасных явлений за 5 лет с 2016 по 2020 г.:

- 1) дождь (дождь, сильный дождь, ливневой дождь, сильный ливневой дождь);
- 2) снег (снег, сильный снег, ливневой снег, сильный ливневой снег);

3) смешанные осадки (дождь и снег, снег и дождь, сильный дождь и снег, сильный снег и дождь, ливневой дождь и снег, ливневой снег и дождь, сильный ливневой дождь и снег, сильный ливневой снег и дождь);

4) осадки, образующие гололед (слабый замерзающий переохлажденный дождь, замерзающий переохлажденный дождь, слабая замерзающая переохлажденная морось, замерзающая переохлажденная морось, ледяная крупа, слабая ледяная крупка);

- 5) метели (низовая метель, поземок);
- 6) туманы;
- 7) пыльная буря;
- 8) явления, ухудшающие видимость (дымка, дым, мгла);
- 9) град;
- 10) гроза;
- 11) шквал.

Для каждого времени года характерны определенные явления погоды. Для холодного периода это в основном снег, смешанные осадки, осадки, образующие гололед, метели, туманы. Для теплого периода – пыльные бури, град, гроза, шквал. Дожди и явления, ухудшающие видимость на территории аэродрома, Гумрак, встречаются в течение всего года (табл.).

На международном аэродроме Гумрак за последние 5 лет можно отметить, что дождь наблюдался в течение всего года. Среднее число дней с дождем за год составляет 10,2. Максимум дней с приходится на июль – 2,4, минимум на апрель и август – 0,2 дня.

Снег на аэродроме за период 2016–2020 гг. выпадает с октября по март. Самая ранняя дата выпадения снега – 23 октября 2016 г., самая поздняя – 30 марта 2017 г. Максимальное число дней наблюдается в январе – 9,2, наименьшее в октябре – 0,6.

Таблица

Среднее число дней с явлениями погоды

Явления/Месяцы	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Дождь	0,4	0,4	1,2	0,2	2	1	2,4	0,2	0,6	1	0,4	0,4
Снег	9,2	6,2	5	0	0	0	0	0	0	0,6	1,8	6
Смешанные осадки	1,4	0,8	1,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4
Осадки, образующие гололед	7,8	2,2	3,2	0	0	0	0	0	0	0	2	11
Метели	6,8	3,8	2,4	0	0	0	0	0	0	0	0,4	4,4
Туманы	12,6	8,6	6,2	2,2	1,8	0,2	0	0	0,6	4,2	8,4	13,6
Пыльная буря	0	0	0	0	0,4	0,2	0	0,4	0	0	0	0
Явления, ухудшающие видимость	17,4	12,2	13,4	5,2	4,4	1,4	2,2	0,6	1,2	7,6	12,6	19,6
Град	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0,2	0,2	0	0
Грозы	0	0	0	2,2	6,8	4,6	7,2	4,6	1,4	0,6	0	0
Шквал	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0

Смешанные осадки наблюдаются с декабря по март. Наибольшее число дней в январе – 1,4. Минимальное количество дней в декабре – 0,4.

Осадки, образующие гололед случаются с ноября по март. Среднее число дней за год составляет 26,2, наибольшее в декабре – 11 дней, наименьшее в ноябре – 2 дня.

Метели на аэродроме Гумрак отмечаются с ноября по март. Максимум повторяемости составляет январе – 6,8, минимум – в ноябре 0,4.

Туманы в Гумраке образуются с сентября по июнь. Среднегодовая повторяемость туманов за период 2016–2020 гг. составляет 58,4 дней. Ранняя дата возникновения тумана зафиксирована 3 сентября 2019 г. в утренние часы с 5:30 до 6:30. Самая поздняя дата – 11 июня 2017 г. с 2:30 до 3:30. Максимальное число дней в декабре – 13,6, минимальное – в июне 0,2 дня.

Пыльные бури на территории аэродрома Гумрак отмечались 5 раз на протяжении 5 лет, следовательно, среднегодовое количество дней составило 1 день. В 2017 г. пыльная буря наблюдалась 13 июня в 16:00 и 23 августа с 12:30 до 19:00. В 2018 г. данное явление отмечалось в ночь с 25 мая на 26 мая, продолжительность с 23:30 до 00:30. Также в 2018 г. пыльная буря была зафиксирована 6 августа в 18:00.

Явления, ухудшающие видимость, наблюдаются на протяжении всего года. Среднегодовая продолжительность данного явления составляет 97,8 дней. Максимальное количество дней зафиксировано в декабре – 19,6, минимальное в августе – 0,6 дней.

Опасное явление, такое как град, было зафиксировано за 5 лет всего 3 раза: 16 мая 2016 г., 5 октября 2018 г., а также 21 сентября 2019 г. В последнем случае град сопровождался грозой.

Грозы наблюдаются в теплое полугодие с апреля по октябрь. Ранняя дата возникновения данного явления приходится на 4 апреля 2017 г., наиболее поздняя дата – 5 октября 2018 г. Среднегодовое количество дней с грозой составляет 27,4 дней.

Единственный шквал за 5 лет, который встречался на территории аэродрома Гумрак зафиксирован 20 сентября 2020 г.

Список литературы

1. Бобродобро. URL: <https://tran.bobrodobro.ru/728> (дата обращения: 25.10.2022)
2. География. Почвенно-растительные ресурсы. URL: <http://www.volgograd.info/geo/> (дата обращения: 25.10.2022)

УДК 551.515.2

Исследования тропических циклонов северо-западной части Тихого океана

Н. А. Озерова (nadinalex19@mail.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Приводятся результаты исследования тропических циклонов северо-западной части Тихого океана за последние пять лет. Особое внимание уделяется тем тропическим циклонам, которые оказали влияние на погоду Дальнего Востока России. Подробно рассмотрен тайфун Лайонрок. Выбор данного тайфуна связан с его уникальной и нестандартной траекторией перемещения, достаточно сложной для прогнозирования. Было проведено моделирование пространственно-временного распределения основных метеорологических величин тайфуна Лайонрок с использованием мезомасштабной модели WRF-ARW. В результате исследования сделан вывод, что модель достаточно точно воспроизводит основные метеорологические величины изучаемого тропического циклона в пространстве и во времени.

Ключевые слова: тайфун, модель WRF-ARW, Дальний Восток.

Тропические циклоны – это атмосферные вихри, образующиеся в тропических широтах и имеющие пониженное атмосферное давление в центральной части. Диаметр тропических циклонов в среднем составляет 100–300 км. Барические градиенты в тропических циклонах велики и ветер достигает силы шторма – от 110 до 123 км/ч. Во всей области тропического циклона присутствуют сильные восходящие движения воздуха и развивается мощная облачная система с обильными ливневыми осадками и грозами [1].

Из данного краткого описания тропического циклона становится понятно, что это природное явление достаточно опасно для человека, поэтому требует детального изучения.

Рассматриваемые атмосферные вихри проводят обычно свой жизненный цикл в тропических широтах. Из-за этого большая часть территории России не страдает от последствий, вызываемых тропическими циклонами. Единственная территория страны, которая периодически находится под влиянием ураганов, – это Дальний Восток. Причем тропические циклоны могут выходить сюда, как в своей непосредственно тропической форме, так и в форме внепротических циклонов после регенерации на полярном фронте. Второй вариант развития событий наблюдается значительно чаще.

Циклоны, влияющие на погоду Дальнего Востока России (тайфуны), образуются в Тихом океане и в течение своего жизненного цикла также причиняют ущерб Филиппинам, Тайвани, Китаю, Корее и Японии. Воздействие этих атмосферных вихрей сопровождается сильными дождями с количеством осадков, соответствующим критерию стихийного явления, а также сильными ветрами, иногда достигающими в прибрежных районах ураганной силы.

Целью работы является исследование тропических циклонов, образующихся в северо-западной части Тихого океана. Рассматриваемая тема исследования является актуальной в связи с тем, что в год в пределах изучаемой территории образуется около 30 тайфунов. Причем до дальневосточной территории России ежегодно в среднем доходит 2–4 циклона. Каждый из вихрей приносит с собой ухудшение погодных условий: резкое усиление ветра и выпадение большого количества осадков, нередко приводящее к наводнениям.

Именно поэтому необходимо детальное изучение и прогнозирование всех стадий и элементов погоды каждого тропического циклона для избежания последствий или их минимизации. В противном случае некорректный или несвоевременный прогноз может повлечь за собой катастрофические последствия для всех сфер жизнедеятельности.

Для выполнения практической части в работе было использовано два типа данных.

1. База данных JAXA/EORC [3] для исследования тайфунов (траекторий и основных характеристик), оказывающих влияние на Дальний Восток России.

2. Данные анализа модели GFS с шагом сетки $2,5^{\circ}$ и $0,25^{\circ}$ за период с 17 по 30 августа 2016 г. для постановки начальных и граничных условий при моделировании тайфуна Лайонрок. При моделировании были использованы данные с разным шагом сетки для сравнения результатов и для получения более детальной картины исследуемой зоны [2].

Для моделирования была выбрана область, охватывающая регион $10\text{--}50^{\circ}\text{ с. ш.}$, $110\text{--}160^{\circ}\text{ в. д.}$ Данные моделирования за период с 17 по 30 августа 2016 г. сохранялись через каждые три часа.

Во всех численных экспериментах исследовалось пространственно-временное распределение следующих метеорологических величин:

- давление на уровне моря;
- температура воздуха на уровне 2 м;
- температура поверхности океана;
- массовая доля водяного пара на уровне 2 м;
- скорость и направление ветра на высоте 10 м;
- количество осадков.

Исходя из выбранных условий в результате выполнения работы удалось смоделировать циклон. Причем были получены два набора результатов из-за двойного набора данных с разным шагом сетки. Наиболее целесообразно привести здесь результаты, полученные по данным с шагом сетки $0,25^{\circ}$, так как именно они позволяют более детально исследовать эволюцию тайфуна.

Поля метеорологических величин соответствуют действительной природе тропических циклонов: выпадение большого количества осадков в зоне циклона (рис. 1), понижение температуры воздуха (рис. 2) и водной поверхности (рис. 3), а также характерный для тайфунов поворот ветра (рис. 4).

Также необходимо заметить, что положение тропического циклона Лайонрок, полученное моделированием, соответствует реальному положению этого циклона согласно траектории (рис. 5).

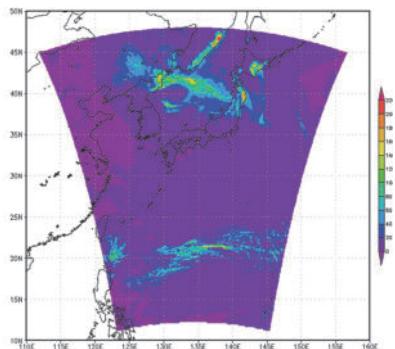


Рис. 1. Количество осадков (срок 21 ч., 30.08.2016)

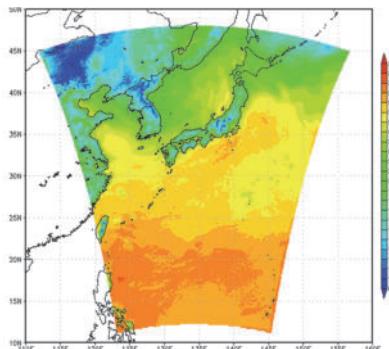


Рис. 2. Температура воздуха на уровне 2 м (срок 21 ч., 30.08.2016)

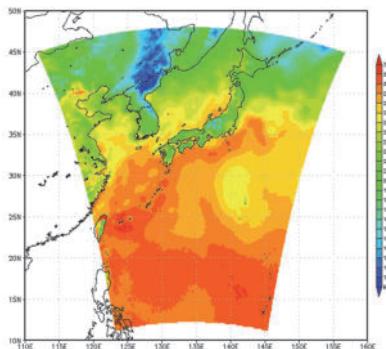


Рис. 3. Температура поверхности океана (срок 21 ч., 30.08.2016)

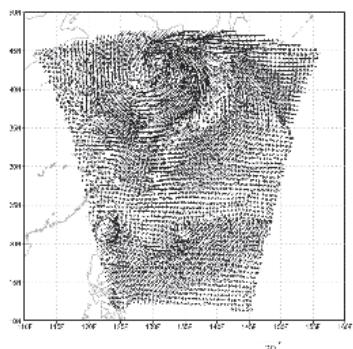


Рис. 4. Скорость и направление ветра на высоте 10 м (срок 21 ч., 30.08.2016)

Далее в работе были построены вертикальные разрезы на 36° с. ш. для атмосферного давления и температуры воздуха за последний срок моделирования.

Согласно реальной траектории (рис. 5), тропический циклон Лайонрок 30 августа 2016 г. в 21:00 UTC находился в пределах 135–140° в. д. На рис. 6 и 7 видно, что в пределах этих же долгот атмосферное давление на вертикальном разрезе значительно меньше окружающего на всех уровнях (рис. 6), а температура – больше, также на всех уровнях (рис. 7). Это говорит об успешных результатах моделирования вертикальной структуры рассматриваемых метеорологических величин.

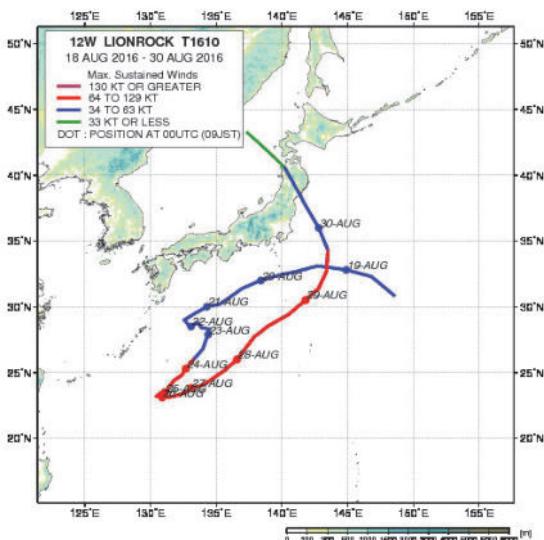


Рис. 5. Траектория тропического циклона Лайонрок [3]

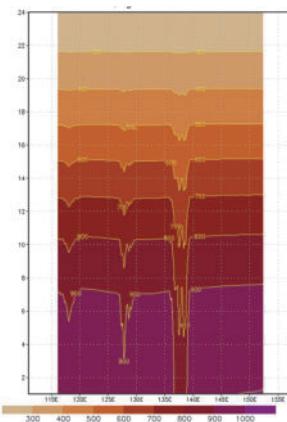


Рис. 6. Вертикальный разрез для атмосферного давления (срок 21 ч., 30.08.2016)

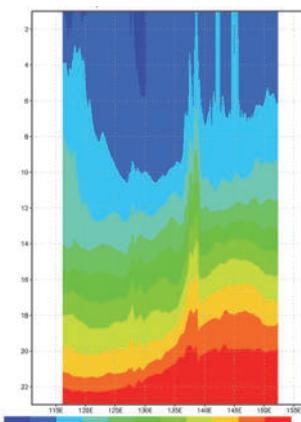


Рис. 7. Вертикальный разрез для температуры воздуха (срок 21 ч., 30.08.2016)

Тайфун Лайонрок образовался в северо-западной части Тихого океана 17 августа 2016 г. Изначально шторм двигался в северо-западном направлении до 19 августа. Следующие пять дней Лайонрок перемещался на юго-запад в связи с образованием барической системы повышенного давление северо-запад-

нее траектории циклона. Достигнув своей самой южной точки траектории 26 августа, тайфун продолжал набирать интенсивность. В то же время он начал движение на северо-восток в связи с углублением внутропического циклона на северо-востоке Китая. 28 августа Лайонрок достиг своей максимальной интенсивности с минимальным давлением, равным 940 гПа.

30 августа тайфун резко повернул на северо-запад в связи с усиливающимся охотоворским антициклоном, который заблокировал движение тропического циклона на север, и над Японским морем трансформировался во внутропический циклон.

В эти же сутки циклон приблизился к южному побережью Приморья, из-за чего в крае начались сильные дожди. Тайфун находился в стадии сильного тропического шторма. Давление в его центре на этот момент было 960 гПа, максимальная скорость ветра составляла 120 км/ч.

В 00:00 UTC 31 августа произошло объединение южного циклона и бывшего тропического циклона Лайонрок в обширную область низкого давления, которая, теряя мощь, переместилась на районы северо-восточного Китая.

В результате проделанной работы можно сделать вывод о том, что с заданными начальными условиями удалось осуществить моделирование тайфуна Лайонрок. Были получены достаточно точные результаты, что можно увидеть при сравнении реальных траекторий циклонов и параметров атмосферы, полученных моделированием и отвечающим характеристикам циклонов в той или иной точке.

Список литературы

1. Наливкин Д. В. Ураганы, бури и смерчи. Географические особенности и геологическая деятельность. Л. : Наука, 1969. 487 с.
2. Озерова Н. А. Исследования тропических циклонов северо-западной части Тихого океана: Выпускная квалификационная работа (ВКР). Бакалаврская работа. СПб., 2021. 106 с.
3. JAXA/EORC Tropical Cyclone Database. URL: https://sharaku.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/typ_db/typ_track.cgi?lang=e&area=WP (дата обращения: 27.02.2021)

УДК 551.50

Прогноз зарождения полярных мезоциклонов на основе индексов конвективной неустойчивости с региональными пороговыми значениями и построение прогностических траекторий их перемещения

С. А. Петриченко (psa@gratuphoon.ru), О. В. Калмыкова (kov@feerc.ru),
С. В. Козлов (kozlov-sv@gratuphoon.ru), Л. К. Кулижникова (kulijnik@yandex.ru)

Научно-производственное объединение «Тайфун» Росгидромета, Обнинск

Аннотация. Представлен прототип автоматизированной системы прогноза полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России, которая позволяет выделить область с заданной вероятностью обнаружения возмущения. Расчет таких областей в последовательные моменты времени позволяет получить траекторию перемещения мезоциклона. В основе прогноза лежит определение районов совпадения зон с превышением региональных пороговых значений отобранной группы индексов конвективной неустойчивости.

Ключевые слова: полярные мезоциклоны, индексы конвективной неустойчивости, региональные пороговые значения, зарождение, перемещение, траектория, прогноз, модель Polar WRF.

Введение

В 1994 г. Рабочей группой по полярным депрессиям Европейского геофизического общества для наименования облачных вихрей α и β мезомасштаба (от 20 до 2000 км), возникающих над морями к полюсу от полярного фронта, рекомендовано пользоваться термином «полярный мезоциклон» (*polar mesocyclone*) [12]. Термин «полярная депрессия» (*polar low*) служит для наименования наиболее интенсивных полярных мезоциклонов со скоростью ветра, превышающей 15 м/с. ПМЦ зачастую сопровождается опасными погодными явлениями – штормовым волнением и ветром, обледенением судов и сооружений, снежными зарядами с ухудшением видимости. Штормовая ситуация развивается, как правило, внезапно и в течение короткого времени.

В Северном полушарии областью наиболее активного мезомасштабного циклогенеза является акватория Северо-Европейского бассейна. Это связано с наличием значительных межширотных температурных контрастов в приводном слое атмосферы, которые особенно велики вблизи ледового барьера и усилены проникновением теплых атлантических вод на север. В сочетании с интенсивным тропосферным переносом эти контрасты создают условия для развития бароклинной неустойчивости в регионе в холодное время года.

Над северными морями России, лежащими к востоку от Новой Земли (Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море), ПМЦ возникают гораздо реже, вследствие меньшей, чем в Северо-Европейском бассейне, площади свободной от льда морской поверхности. В этих областях наблюдается летний максимум в годовом ходе количества ПМЦ в отличие от зимнего максимума в

морях западнее Новой Земли. Возникновение ПМЦ над акваториями морей Восточного сектора Арктики связано, в первую очередь, с переносом относительно теплого воздуха с суши на море [10]. Предполагается, что при наличии тенденции к увеличению акваторий открытой воды в условиях происходящего потепления в этом регионе следует ожидать и возрастания количества возникающих ПМЦ.

Поскольку размеры полярных мезоциклонов незначительны по сравнению с крупномасштабными барическими образованиями (в среднем 200–600 км), а срок их жизни в большинстве случаев менее полутора суток, они достаточно редко отображаются на синоптических картах. Тем не менее, анализ полей давления и геострофической завихренности все же используется для идентификации ПМЦ. Чаще всего такие циклоны обнаруживаются и исследуются на основе реанализа и по данным спутниковых наблюдений [4; 9; 10]. Запуск в 2021 г. российского высокоэллиптического метеорологического спутника “Арктика-М” расширил эти возможности. В последнее время для идентификации ПМЦ актуальными стали и методы численного моделирования с использованием региональных моделей. Например, в работе [2] разрабатываются критерии, позволяющие идентифицировать и исследовать генезис ПМЦ.

Прогноз ПМЦ до настоящего времени является нерешенной проблемой. Существуют отдельные работы, посвященные этому направлению. Например, исследовалась возможность оперативного прогноза полярного мезоциклиона с помощью ансамблевой прогностической системы [11]. Исследуются возможности прогноза с помощью моделирования вариаций синоптических систем типа полярного фронта [6], с использованием расчетных значений интегрального критерия спиральности и кинематического числа завихренности [1].

Полярные мезовихри могут иметь различные механизмы образования. Основные, по современной классификации, это бароклинические и конвективные типы мезоциклонов [3; 5].

Нами ранее было предложено использовать для прогноза ПМЦ индексы конвективной неустойчивости. Поля различных конвективных индексов могут иметь особенности в областях мезоциклонов, возникающих при различных синоптических ситуациях, поскольку связаны как с термическими, так и с динамическими характеристиками атмосферных процессов. Расчет полей конвективных индексов для уже идентифицированных ПМЦ и их сопоставление с наблюдаемыми характеристиками позволили выделить ограниченный перечень этих индексов в качестве предикторов. Для каждого используемого индекса были определены региональные пороговые значения. Суперпозиции их полей, по нашему мнению, дают возможность вероятностного прогнозирования зарождения ПМЦ [7; 8]. На основе полученных результатов был разработан программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме формировать вероятностные прогностические карты угроз возникновения и перемещения ПМЦ.

Программные средства

Технологическая линия построения прогнозов полярных мезоциклонов в Арктическом регионе РФ включает в себя:

- а) численную модель PolarWRF-ARW 4.1.5 (PWRF) с выбранными настройками и параметризациями подсеточных процессов;
- б) программный модуль для расчета полей индексов конвективной неустойчивости;
- в) программный модуль для расчета полей вероятности образования ПМЦ на основе отобранный конфигурации Индексов, каждому из которых сопоставлено свое региональное пороговое значение;
- г) комплекс программ запуска расчетов по расписанию;
- д) программный модуль построение карт областей риска образования ПМЦ.
- е) программный модуль для расчета центров областей с заданной вероятностью риска обнаружения ПМЦ.
- ж) программный модуль для отрисовки траекторий перемещения центров областей с заданной вероятностью риска обнаружения ПМЦ.

Схематично работу технологической линии можно представить следующим образом.

На FTP-сервере НПО Тайфун, имеющем доступ к сети Интернет, по заданному расписанию запускается программа, которая обращается к специализированному серверу Национального центра по прогнозированию окружающей среды NCEP и проверяет наличие результатов счета по модели GFS от 00ч UTC текущей рассматриваемой даты. Если прогнозы доступны для скачивания, с помощью свободно распространяемой программы wget осуществляется их загрузка на FTP-сервер. По окончании загрузки по протоколу ftp файлы прогнозов передаются на специально оборудованный сервер для хранения больших объемов информации – Хранилище данных.

На Расчетном сервере с установленной системой PWRF по заданному расписанию с помощью специальных скриптов реализуется запрос к Хранилищу данных на получение требуемых прогнозов GFS. При наличии соответствующих прогнозов они загружаются на Расчетный сервер, и запускается расчет по модели PWRF с последующей обработкой ее выходной продукции.

В процессе расчета по модели PWRF формируются выходные файлы, содержащие прогностические данные по стандартным метеоэлементам (температура, давление, влажность, скорость ветра и др.) в узлах расчетной сетки на различных вертикальных уровнях. Эти данные используются для последующего расчета полей индексов конвективной неустойчивости атмосферы.

Для расчета индексов используется специально разработанный программный модуль, по результатам работы которого формируются выходные файлы, содержащие значения около 100 индексов конвективной неустойчивости.

На основе выбранной конфигурации индексов строится поле вероятности образования ПМЦ. Расчет вероятности производится с помощью специально разработанного программного модуля. При расчете вероятности используется,

как это отмечалось нами ранее, следующее предположение: чем больше индексов идентифицировали закритическую область, тем большее вероятность того, что в этой области может быть обнаружен ПМЦ.

В настоящий момент для идентификации ПМЦ используется блок из десяти конвективных индексов, в который входят группы индексов, связанных с завихренностью, со скоростью и сдвигом скорости ветра, а также с градиентами температуры и с влажностью в нижнем слое атмосферы. Для каждого из используемых индексов определены региональные критические значения. В некоторых случаях эти значения определены именно для ПМЦ. Например, общепринятое значение сдвига ветра в нижнем трехкилометровом слое атмосферы в обычной конвективной системе более 5 м/с. Для ПМЦ нами установлено менее 5 м/с (по аналогии с тропическими циклонами, которые не развиваются при большом вертикальном сдвиге ветра).

На следующем этапе работы технологической линии осуществляется построение карт областей риска образования ПМЦ (на базе вышеупомянутых полей вероятности), а также карт приземной температуры и приземной скорости ветра.

Далее реализуется алгоритм отслеживания перемещения областей существования возмущений. В выделенных зонах с 70 % вероятностью возникновения ПМЦ на комплексной пространственной картине рассчитываются геометрические центры масс предполагаемых ПМЦ. Расчеты проводятся для каждого момента времени исходного прогноза. По результатам сопоставления центров масс, рассчитанных за последовательные моменты времени, производится их группировка по принадлежности к одному и тому же ПМЦ. Центры масс, отнесенные к одному ПМЦ, в порядке их расчета соединяются прямой линией. Таким образом, формируется прогностическая траектория перемещения рассматриваемого ПМЦ.

Для расчета положения центров областей 70 % вероятности обнаружения ПМЦ в последовательных по времени прогнозах разработан дополнительный программный модуль.

На заключительном этапе работы осуществляется построение карт с прогностическими траекториями перемещения центров областей с заданной вероятностью обнаружения ПМЦ. Эти траектории, по нашему мнению, в определенной степени отражают возможную картину перемещения реального мезоциклиона.

Разработанная технологическая линия была запущена в работу в тестовом режиме последовательно: с ноября 2021 г. – прогноз возникновения ПМЦ, с августа 2022 г. – прогноз перемещения ПМЦ. В процессе работы проводится отладка и доработка отдельных элементов системы.

Тестовые расчеты

Моделирование проводится один раз в сутки, заблаговременность прогноза – до 48 ч. По результатам моделирования формируются выходные поля стандартных метеоэлементов с часовым шагом по времени, шаг расчетной сетки составляет 12 км. Расчетная область включает в себя практически всю акваторию Баренцева и Карского морей, а также западную часть моря Лаптевых – это обла-

сти, где сравнительно часто наблюдаются ПМЦ. В качестве начальных и граничных условий при проведении расчетов используются прогностические данные глобальной модели GFS с разрешением $0,5^{\circ}$ (счет от 00ч UTC). На рис. 1 представлена область интегрирования, а в табл. 1 даны сведения об используемых настройках модели PWRF.



Рис. 1. Область интегрирования модели PWRF

Таблица 1
Настройки модели PWRF

Параметр	Используемое значение
Размер расчетной области	187 x 187 узлов
Шаг сетки	12 км
Число вертикальных уровней	50
Временной шаг вывода данных	1 ч
Разрешение статических данных	30 с
Проекция карты	polar
Координаты центра	60°E, 77°N
Период моделирования	48 ч

Для удобства анализа карты риска образования ПМЦ формируются в виде трех уровней опасности по типу “светофора”: зеленый уровень – вероятность образования ПМЦ в диапазоне 0–50 %, желтый уровень – от 50 до 70 %, красный уровень – больше 70 %.

Для оценки возможностей созданного прототипа автоматизированной прогностической системы ниже, в качестве примера, приведены прогностические расчеты для мезоциклона, наблюдавшегося в акватории Баренцева моря в марте 2022 г.

На рис. 2 представлены два последовательных спутниковых изображения района Баренцева моря с явно выраженным полярным мезоциклоном (снимок с сайта НИЦ “Планета”) за 08 марта 2022 г. На рис. 3 – последовательные прогностические карты областей риска образования ПМЦ, рассчитанные на те же сроки. На рис. 4 – последовательные прогностические поля модуля приземного ветра для той же ситуации.

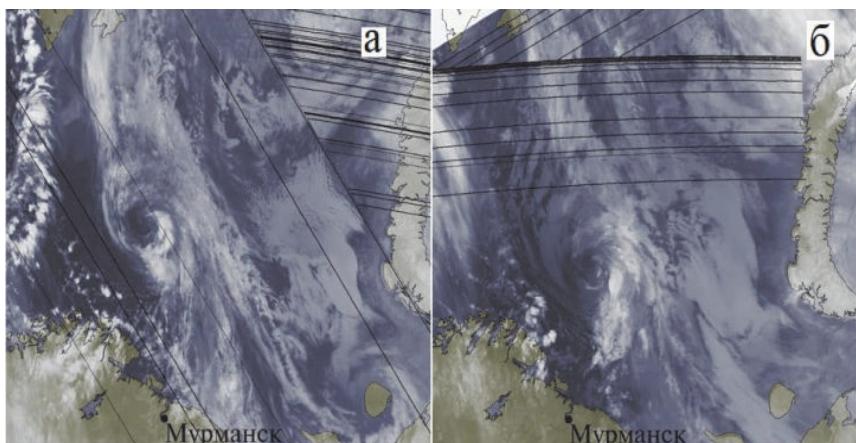


Рис. 2. Спутниковые изображения акватории Баренцева моря с ПМЦ 8.03.2022 г.
в 8:39 UTC (а) и в 16:50 UTC (б)

Из рис. 3 видно, что область высокой вероятности обнаружения ПМЦ, отмеченная цифрой 1, располагалась в непосредственной близости от реального положения мезоциклона в соответствующие моменты времени.

На рис. 4 в той же зоне (также отмечена цифрой 1) наблюдается динамическая структура характерная для полярных мезоциклонов, которые, как отмечалось в многочисленных работах, имеют динамическую структуру подобную тропическим циклонам с минимумом скорости в центре и максимумом – на периферии.

На рис. 5 представлена прогностическая траектория перемещения этого мезоциклона. Цифры на карте отражают последовательность (по времени) обнаружения соответствующего центра, прогнозируемого ПМЦ. Фактически (n-1) – это время в часах от начала прогноза. В данном случае предполагаемая продолжительность существования ПМЦ составила 27 ч.

На рис. 3 и 4 цифрой 2 отмечено возмущение, возникшее в районе 12 ч UTC 8 марта северо-западнее северной оконечности Новой Земли. К сожалению, на спутниковых снимках этот район находился за границей области наблюдений. Тем не менее, увеличение площади зоны с высокой вероятностью возникновения ПМЦ (рис. 3) и рост скорости приземного ветра до величин порядка 15 м/с и больше (рис. 4) позволяют предположить, что там возможно возник не очень мощный полярный мезоциклон. Его прогностическая траектория приведена на рис. 6.

Вероятная продолжительность существования этого возмущения 16 ч. Отсутствие характерной динамической структуры возможно связано со слабой интенсивностью возмущения.

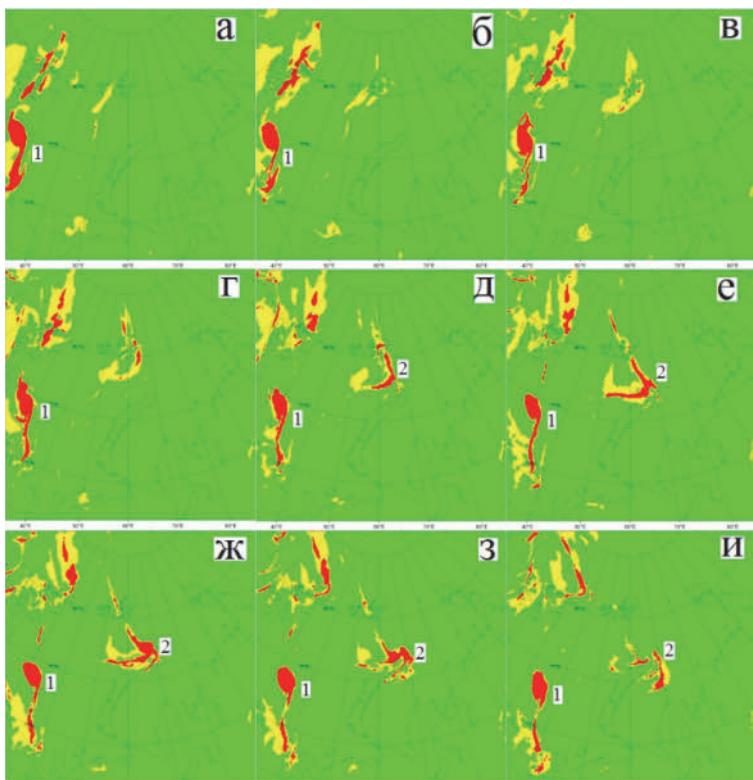


Рис. 3. Прогностические карты от 00 ч UTC 8.03.2022 г. областей риска образования ПМЦ за период с 00 UTC 8.03.22 г. (а) до 00 UTC 9.03.22 г. (и) с интервалом в 3 ч

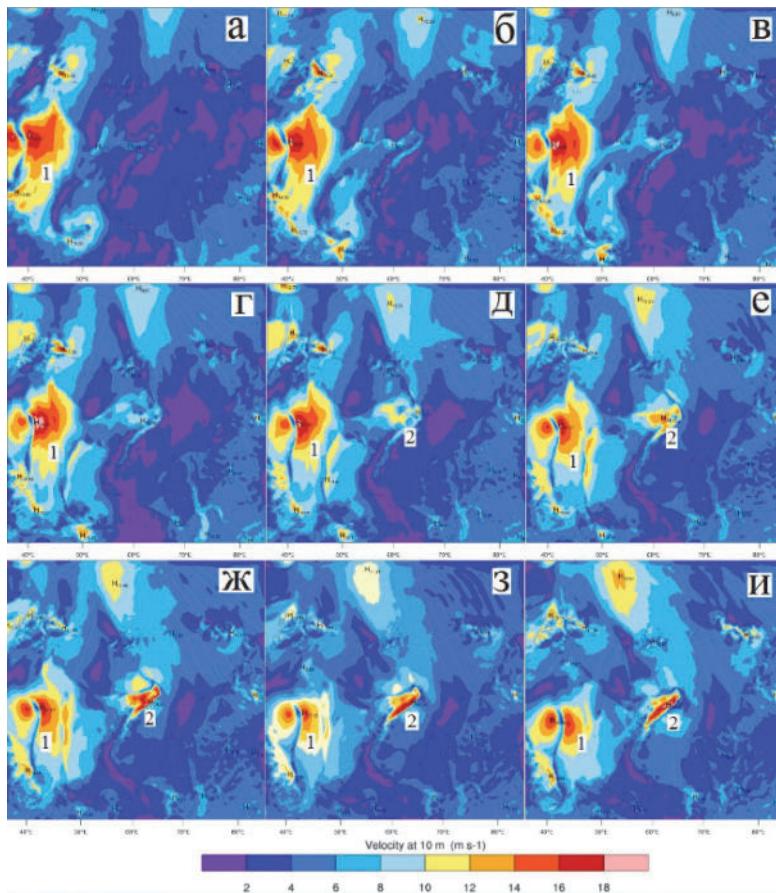


Рис. 4. Прогностические поля модуля скорости ветра от 00 ч UTC 8.03.2022 за период с 00 UTC 8.03.22 г. (а) до 00 UTC 9.03.22 г. (и) с интервалом в 3 ч

Резюме

Создана технологическая линия построения в автоматическом режиме прогноза возникновения и перемещения полярных мезоциклонов. Как показал опыт ее недолгого использования, отдельные элементы этой системы требуют дальнейшего совершенствования. Особенно это относится к блоку прогноза перемещения ПМЦ. Тем не менее, первые результаты, полученные с ее помощью, позволяют утверждать, что выбранные подходы по построению вероятностных прогнозов возникновения и перемещения ПМЦ могут дать положительный эффект.

Результаты проведенных в реальном времени тестовых расчетов подтвердили работоспособность системы.

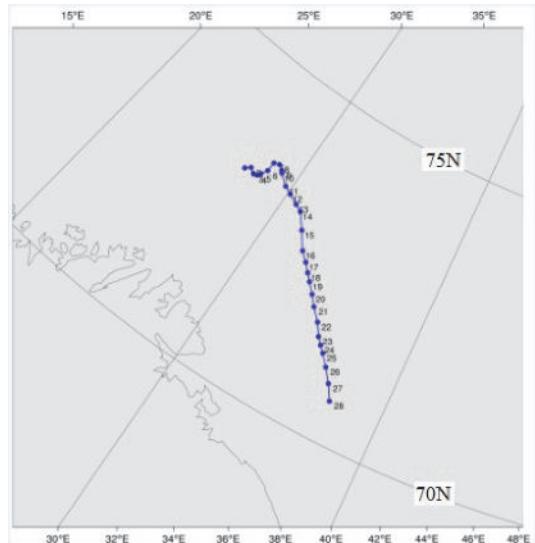


Рис. 5. Прогностическая траектория перемещения мезоциклона, представленного на рис. 2, от 00 ч UTC 8.03.2022 г. до 03 ч UTC 9.03.2022 г.

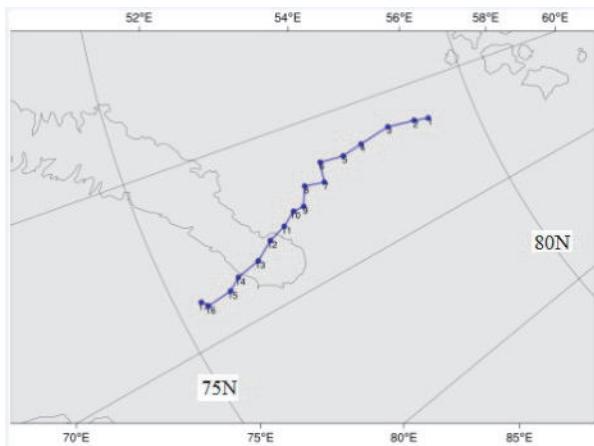


Рис. 6. Прогностическая траектория перемещения возмущения, отмеченного цифрой 2 на рис. 3 и 4, от 11 ч UTC 8.03.2022 до 03 ч UTC 9.03.2022

Список литературы

1. Вазаева Н. В., Чхетиани О. Г. О вихревых критериях прогнозирования полярных мезоциклонов // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск. 24–26 нояб. 2021 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2021. С. 266–274.
2. Вазаева Н. В., Чхетиани О. Г., Дурнева Е. А. О критериях идентификации полярных мезоциклонов // Метеорология и гидрология. 2022. № 4. С. 20–33.
3. Классификация Арктических мезовихрей / Р. И. Гончаров, Д. М. Караваев, Б. Г. Колесов, А. Б. Лебедев // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды : материалы VI Всерос. науч. конф. Санкт-Петербург, 16–18 сент. 2020 г. СПб. : Изд. ВКА им. А. Ф. Можайского, 2020. С. 159–164.
4. Гурвич И. А., Заболотских Е. В. Мезомасштабные полярные циклоны над восточным сектором Арктики по данным мультисенсорного спутникового зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 3. С. 101–112.
5. Ефимов В. В., Яровая Д. А., Комаровская О. И. Мезомасштабный полярный циклон по спутниковым данным и результатам численного моделирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 1. С. 223–233.
6. Минзялев И. В., Орлов К. Г., Минзялев В. С. Механизм формирования полярных циклонов и возможность их предсказания по данным спутниковых наблюдений // Космические исследования. 2012. Т. 50, № 2. С. 166–175.
7. Петриченко С. А., Калмыкова О. В., Козлов С. В. Расчет полей вероятности зарождения (обнаружения) полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России с использованием региональных пороговых значений индексов конвективной неустойчивости // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 24–26 нояб. 2021 г. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2021. С. 329–337.
8. Прототип автоматизированной системы прогноза возникновения полярных мезоциклонов в Арктическом регионе России / С. А. Петриченко, О. В. Калмыкова, С. В. Козлов, Л. К. Кулижникова // Опасные явления – IV : материалы IV Междунар. науч. Конф. памяти члена-корреспондента РАН Д. Г. Матишова. Ростов-на-Дону, 5–9 сент. 2022 г. Изд. ЮНЦ РАН. 2022. С. 155–160.
9. Смирнова Ю. Е., Голубкин П. А. Оценка доли полярных циклонов, воспроизводимых атмосферными реанализами, с использованием различных наборов данных // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 1 (111). С. 97–108.
10. Яровая Д. А., Ефимов В. В. Климатологические особенности полярных мезомасштабных циклонов над восточным сектором евразийской Арктики по данным реанализа ASR // Метеорология и Гидрология. 2022. № 4. С. 5–19.
11. Kristiansen J., Sørland S., Iversen T., Bjørge D., Køltzow M. High resolution ensemble prediction of a polar low development // Tellus A. 2011. Vol. 63. P. 585–604.
12. Rasmussen E., Turner J. Polar Lows. Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge University Press, 2003. 612 p.

УДК 551.5

Оценка пространственно-временного распределения SPI на территории Северного Казахстана

Л. С. Рысалиева (marchoctmay@gmail.com)

Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Аннотация. Для определения общих условий увлажненности на протяжении всего года и для выделения длительных сухих и влажных периодов рассчитан стандартизированный индекс осадков (SPI) с временным шагом 12 месяцев (SPI 12) на территории Северного Казахстана по восьми метеорологическим станциям (Актогай, Амангельды, Астана, Павлодар, Петропавловск, Рузаевка, Торгай, Явлена) за 30-летний период (1990–2020 гг.).

Ключевые слова: атмосферная засуха, засушливость, экстремальные явления погоды, метеорологические индексы засушливости, SPI.

Введение

Большая часть территории Республики Казахстан располагается в аридных и полуаридных зонах, здесь засухи являются одним из потенциально опасных природных процессов. В результате засухи наносят огромный экономический и социальный ущерб – снижая продуктивность сельскохозяйственного сектора, что влечет за собой цепочку последствий затрагивая животноводство, растениеводство и имея серьезные последствия для поставок продовольствия и средств к существованию, а также приводит к дефициту водных ресурсов, которые необходимы для ведения сельскохозяйственной деятельности и социально-экономического развития страны. В особенности засухи затрагивают и северную часть Казахстана – поставщика зерновых культур для многих стран [5].

Засуха является очень частым явлением в Республике Казахстан, и она усугубляется изменением климата и растущим антропогенным давлением, а также угрожает водной безопасности региона.

Актуальность исследования засух обусловлена, в первую очередь ее последствиями для природной среды и общества всего земного шара. Большая часть территории Республики Казахстан располагается в аридных и полуаридных зонах, здесь засухи являются одним из потенциально опасных природных процессов. В результате засуха наносит огромный экономический и социальный ущерб, снижая продуктивность сельскохозяйственного сектора, что влечет за собой цепочку последствий, затрагивая животноводство, растениеводство и имея серьезные последствия для поставок продовольствия и средств к существованию, а также приводит к дефициту водных ресурсов, которые необходимы для ведения сельскохозяйственной деятельности и социально-экономического развития страны.

Цель данной работы – провести статистический анализ засушливости территории северного Казахстана за последние 30 лет и выявить длительные засушливые и влажные периоды.

Материалы и методы исследования

Для выполнения оценки засушливости, был использован Стандартизованный индекс осадков (SPI) – это метеорологический индекс для мониторинга засушливости, основанный только на количестве осадках, который является относительно простым в использовании и вычислении. Индекс был рекомендован Всемирной метеорологической организацией (ВМО) в 2009 г. для использования всеми национальными гидрометеорологическими службами. Фундаментальной силой такого индекса является его круглогодичность, т. е. он может быть рассчитан для различных временных масштабов от месяца до нескольких лет и то, что его данные могут быть сопоставлены в различных климатических регионах [6].

Расчет SPI представляет из себя преобразование временных рядов осадков с применением гамма-распределения, а затем нормирование полученных вероятностей в стандартизированный индекс осадков:

$$SPI = F^{-1}G(R), \quad (1)$$

где G – интегральная функция гамма-распределения; R – количество осадков; F^{-1} – обратное нормированное гауссово распределение [4].

Процедура расчета включает преобразование временных рядов осадков с применением гамма-распределения, а затем нормирование полученных вероятностей в стандартизированный индекс осадков:

Процедура расчета включает преобразование временных рядов осадков с применением гамма-распределения, а затем нормирование полученных вероятностей в стандартизированный индекс осадков:

Положительные значения SPI характеризуют собой влажные условия. Отрицательные значения SPI представляют собой засушливые условия; чем ниже SPI, тем более сухим является исследуемый период времени. Классификационная шкала, предложенная автором, приводится в таблице 1 [1–3, 6].

Таблица 1
Категории засухи по данным стандартизированного индекса осадков

Категории засухи	Значение SPI
Экстремально влажно	более 2,00
Очень влажно	1,50–1,99
Умеренно влажно	1,00–1,49
Увлажнение около нормы	0,00–0,99
Мягкая засуха	от 0 до -0,99
Умеренная засуха	от -1,00 до -1,49
Сильная засуха	от -1,50 до -1,99
Экстремальная засуха	менее -2,00

Расчет стандартизированного индекса осадков SPI был произведен с помощью программного обеспечения RStudio (язык программирования R) по единственным входным данным – количество осадков за месяц. Временные ряды осадков для расчета SPI должны быть достаточно длинными, не менее 30 лет. Поскольку стандартизированный индекс осадков связан с вероятностями, для каждого конкретного пункта можно определить вероятность возникновения засухи той или иной интенсивности.

SPI определялся для разных интервалов времени: SPI3, SPI6, SPI9, SPI12.

В данной работе проведена оценка пространственно-временного распределения стандартизированного индекса осадков SPI за период 1990–2020 гг. для территории северного Казахстана по 8 метеорологическим станциям (Актогай, Амангельды, Астана, Павлодар, Петропавловск, Рузаевка, Торгай, Явленка).

В работе будут продемонстрированы результаты SPI12, так как такой временной масштаб определяет общие условия увлажненности на протяжении всего года и используется для выделения длительных сухих и влажных периодов.

Оценка атмосферной засухи

В работе был проведен анализ исходных данных, был рассчитан стандартизированный индекс осадков SPI по территории северного Казахстана. Также выполнен статистический анализ засушливости на территории северного Казахстана по восьми метеостанциям МС (Актогай, Амангельды, Астана, Павлодар, Петропавловск, Рузаевка, Торгай, Явленка) по полученным результатам стандартизированный индекс осадков SPI12 по каждому месяцу рассматриваемого периода с 1990 по 2020 г.

Полученные результаты SPI12 в программном обеспечении RStudio по восьми метеостанциям за период 1990–2020 гг. визуально представлены ниже на рис. 1–8.

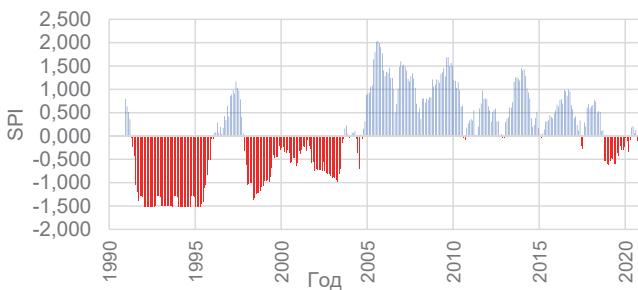


Рис. 1. Временное распределение индекса SPI12 по МС Актогай

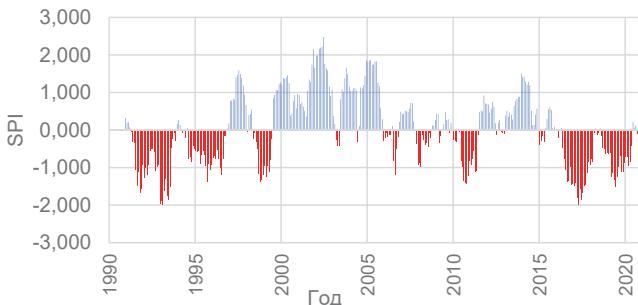


Рис. 2 Временное распределение индекса SPI12 по МС Амангельды

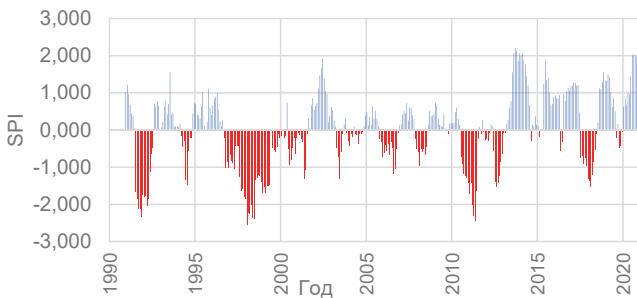


Рис. 3. Временное распределение индекса SPI12 по МС Астана

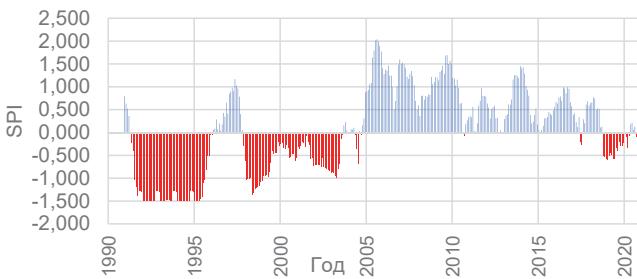


Рис. 4. Временное распределение индекса SPI12 по МС Павлодар

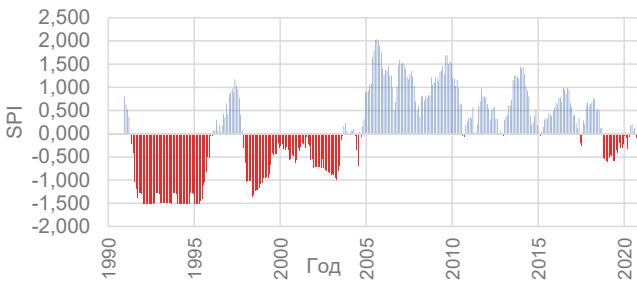


Рис. 5. Временное распределение индекса SPI12 по МС Петропавловск

В соответствии с рис. 1, 4–8 заметно, что в районах Актогай, Павлодар, Петропавловск, Рузаевка, Торгай, Явлена периода с 1990 по 2005 г. является засушливым, так как значения SPI варьируются от 0,0 до -1,5. Однако в 1990, 1996, 1997 гг. наблюдается умеренная влажность. Далее в последующие 13 лет, период 2006–2018 гг. является увлажненным, значения SPI варьируются от 0,0 до 2,0. Наименьшее значение наблюдается в 1992 и 1994 гг. а наибольшее в 2005 г. (-1,45, 1,55 соответственно). Также на каждой из этих станций июль и август 2005 г. являлся экстремально влажным со значениями SPI 2,01 и 2,03 соответственно.

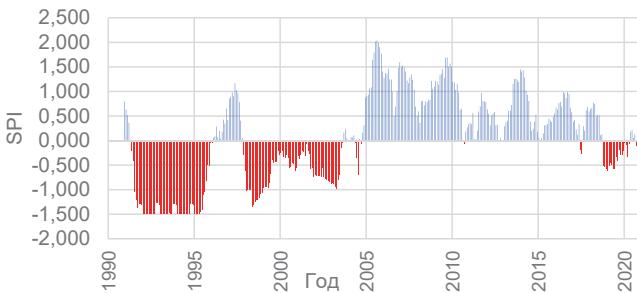


Рис. 6. Временное распределение индекса SPI12 по МС Рузаевка

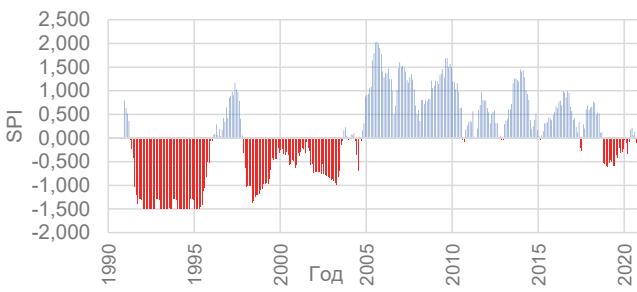


Рис. 7. Временное распределение индекса SPI12 по МС Торгай



Рис. 8. Временное распределение индекса SPI12 по МС Явленка

По рис. 2 и 3 в районах расположения метеорологических станций Амангельды, Астана, распределение SPI12 по годам неоднородное. Мягкая, умеренная и сильная засухи возникали практически ежегодно. Например, в районе МС Амангельды наименьшее значение отмечается в 1993 г. (-1,06), что характеризует умеренную засуху. Также если рассматривать внутригодовой ход SPI, то декабрь 1992 г. и февраль 1993 гг. являются сильно засушливыми. Отмечается также экстремальная влажность в июне 2002 г. В районе МС Астана наименьшее

значение отмечается в 1998 г. ($-1,82$), что характеризует сильную засуху. Также если рассматривать внутригодовой ход SPI, то январь 1998 г. является экстремально засушливым. Умеренно влажным отмечается 2020 г. ($1,44$), экстремальная влажность наблюдалась в июне 2013 г.

В рамках данной работы были рассмотрены и оценены влажный период и засушливый период. Если рассматривать 1990–2020 гг. и все восемь МС, то можно отметить, что за весь рассматриваемый период повторяемость засухи составила 45 %, а влажного периода 55 %.

Таким образом, согласно проведенному краткому статистическому анализу по восьми метеостанциям (МС) северной части Казахстана (Актогай, Амангельды, Астана, Павлодар, Петропавловск, Рузаевка, Торгай, Явленка) в период 1990–2020 гг., было выявлено, что увлажнение рассматриваемого района около нормы, так как среднее значение SPI за весь период и по всем МС варьируется в пределах от 0,1–0,99.

Выводы

Северный Казахстан привлекает особое внимание ученых так как данная территория является крупнейшим зерносыющим регионом. Однако для стран Центральной Азии, либо для схожего по климатическим условиям региона нет единого разработанного индекса или показателя для определения засухи.

В данной работе для параметризации атмосферных засух был изучен метеорологический индекс SPI. Также для определения общих условий засушливости на протяжении всего года и выделения длительных сухих и влажных периодов в данной работе был использован стандартизованный индекс осадков (SPI) и рассчитан SPI12 с временным масштабом 12 месяцев.

В соответствии с этим было выявлено, что на большей части территории северного Казахстана в рассматриваемый период 1990–2020 гг. промежуток периода с 1990 по 2005 г. отмечались засушливые условия, а промежуток периода с 2006 по 2018 г. характеризовался как увлажненным.

Таким образом весь рассматриваемый 30-летний период на территории северного Казахстана повторяемость засушливого периода составила 45 %, а влажного периода 55 %.

Список литературы

1. *Issanova G., Abuduwaili J.* Aeolian Processes in the Arid Territories of Central Asia. Springer. 2017.
2. Global burned area and biomass burning emissions from small fires / Randerson J. T., Chen Y., van der Werf G. R., Rogers B. M., Morton D. C. // *J. Geophys.* 2012.
3. Клименко В. В. Почему замедляется глобальное потепление? // Доклады Академии наук РФ. 2011. Т. 440, № 4. С. 536–539
4. McKee T. B., Doesken N. J., Kliest J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, USA., 1993. Р. 179–184.
5. Рысалиева Л. С., Сальников В. Г. Исследование атмосферной засухи в Центральной Азии // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 2 (57). С. 110–120. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-2-110-120>.
6. Svoboda M. D., Fuchs B. Handbook of Drought Indicators and Indices. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016. 46 p.

Секция 5

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ ПРИРОДНЫХ И СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

УДК 631.92

Оценка агрометеорологических условий выращивания гречихи посевной (*Fagopyrum esculentum Moench.*) на территории Алтайского края

С. М. Авдеев (avdeev@rgau-msha.ru), Е. А. Дронова (edronova@rgau-msha.ru),
И. Ф. Асауляк (iasaulyk@rgau-msha.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва

Аннотация. Целью статьи является обоснование выращивания культуры гречихи посевной на территории Алтайского края на основе анализа агроклиматических и агрометеорологических показателей. При этом поставлены следующие задачи: установить суммы температур и осадков, даты перехода через 0, 5, 10 и 15 °C и продолжительность вегетационных периодов культуры; проанализировать динамику средней многолетней температуры воздуха и сумм осадков, изменение периодов дат перехода температуры воздуха через 0, 5, 10 и 15 °C, изменение продолжительности периодов, сумм температур и условий влагообеспеченности; проанализировать условия тепло- и влагообеспеченности фаз развития гречихи посевной; сравнить полученные данные со среднемноголетними значениями и составить агроклиматическую характеристику возделывания гречихи посевной на территории Алтайского края.

Ключевые слова: температура, осадки, урожайность.

По результатам агрометеорологических и агроклиматических наблюдений возможно оценить влияние условий погоды на развитие и состояние посевов сельскохозяйственных культур. Их влияние в значительной мере обуславливает величину урожая, качество продукции, а также ее стоимость. Поэтому необходимо уметь грамотно использовать ресурсы климата для повышения продуктивности сельскохозяйственного производства и эффективно противостоять неблагоприятным метеорологическим явлениям, происходящим в атмосфере. [1]

Алтайский край расположен в юго-восточной части Западной Сибири. Его площадь составляет 169,1 тыс. км. По характеру рельефа и природным особенностям на территории края выделяются Кулундинская равнина. Приобское плато, долина Оби, Бийско-Чумышская возвышенность, предгорье и Горный Алтай.

Объ на территории края протекает в низких берегах, сложенных легкоразмываемыми отложениями, и представляет собой равнинную реку с малыми уклонами и долины, ширина которых достигает нескольких десятков километров. На всем протяжении реки много перекатов. Средние скорости течения в межень составляют 0,5–0,7 м/с, в половодье – 2,0–2,5 м/с.

На территории края каштановые почвы распространены в зоне сухих степей. В геоморфологическом отношении эти районы относятся к области Кулундинской озерной равнины и области дельт ложбин древнего стока. Каштановые почвы развиты преимущественно на склонах плоских увалов или приозерных котловин и ложбин, но в крайних западных районах распространены также и на основной поверхности Кулундинской равнины.

Черноземы южные формируются в условиях засушливых типчаково-ковыльных степей. Располагаются они к востоку от Кулундинского озера, от долины Бурлы на севере до долины Алей на юге. В области предгорных равнин они занимают ограниченную площадь, тяготеющую лишь к самым западным окраинам предгорных, раввин. Выщелочные черноземы особенно широко распространены на Бийско-Чумышской возвышенности и на правобережье р. Чумыша. Эти почвы относятся к группе хороших плодородных почв, обладающих большими запасами питательных веществ.

Климат Алтайского края определяется сложным взаимодействием циркуляции атмосферы и характера подстилающей поверхности. Отличается он жарким, но коротким летом, холодной малоснежной зимой с сильными ветрами и метелями. Континентальность климата края наиболее ярко подчеркивают ранние заморозки в теплое время года, которые возможны даже в вегетационный период.

Средняя температура воздуха самого теплого месяца (июля) 18–21 °C. Максимальная температура воздуха в отдельные годы может достигать в западной половине 40–41 °C, в восточной 37–39 °C. Наиболее высокие температуры летом наблюдаются в районах Кулунды.

Самый холодный месяц – январь. Средняя температура воздуха в январе минус 16–20 °C. Абсолютный минимум температуры в отдельные годы от западных до восточных границ края изменяется на 10, достигая в Кулундинской, Алейской степях и предгорьях Алтайских гор минус 44–48 °C, в восточной же части края от р. Оби до предгорий Салаирского кряжа минус 52–54 °C. Амплитуда колебаний экстремальных температур достигает на левобережье Оби 85–90 °C, на правобережье 90–95 °C.

Продолжительность периода со средней суточной температурой воздуха выше нуля градусов в крае 190–205 дней. Ежегодно в течение 2,5–3,5 месяца на большей части рассматриваемой территории средняя температура воздуха превышает 15 °C, а на юго-западе края от 15 до 40 дней средняя суточная температура воздуха превышает 20° C.

Распределение снежного покрова по территории находится в полной зависимости от термического режима. В степных районах края снег выпадает на 1–7 дней позднее даты перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °C, т. е. ложится уже на охлажденную землю. По долине Оби даты перехода средней суточной температуры воздуха через 0 °C и выпадение снега сближаются [2; 3].

На основе средних многолетних данных агроклиматических ресурсов можно произвести оценку агроклиматических условий периода вегетации гречихи за 11 лет по метеорологической станцией Барнаул, расположенной в центральной части региона (табл. 1).

Вегетационный период гречихи разбит на четыре межфазных периода:

- 1) посев – всходы;
- 2) всходы – появление соцветий;
- 3) появление соцветий – созревание;
- 4) посев – созревание.

Таблица 1
Агрометеорологические условия периода «посев-всходы» МС Барнаул

Год	Фазы развития		N дней	T _{ср,} °C	$\sum T_{акт}$ °C	ΣR , мм	ГТК	$\sum d$, мб	T _{max,} °C
	Посев	Всходы							
2003	09.06	16.06	8	20,6	165	16	0,9	10	32
2004	08.06	14.06	7	19,8	139	5	0,4	11	33
2005	02.06	08.06	7	16,1	113	13	1,2	8	32
2006	06.06	12.06	7	19,8	138	5	0,4	12	33
2007	08.06	14.06	7	14,2	99	18	1,8	7	30
2014	06.06	12.06	7	13,3	93	11	1,2	8	32
2016	01.06	08.06	8	17,7	142	0,1	0,01	11	31
2017	04.06	08.06	5	17,2	86	7	0,8	9	34
2018	07.06	14.06	8	19,3	154	13	0,9	11	32
2019	01.06	08.06	8	16,6	133	10	0,7	7	30
2020	25.05	30.05	6	16,8	101	10	1,0	7	33

Анализируя многолетние данные, представленные в таблице 1, можно установить, что в среднем на МС Барнаул посев гречихи производят 4 июня. Самая ранняя дата посева за исследуемый период отмечается в 2020 г. – 25 мая, а самая поздняя в 2003 г. – 9 июня.

Средняя дата появления всходов гречихи вблизи территории МС Барнаул приходится на 10 июня. Наиболее ранняя дата всходов за исследуемый период отмечается в 2020 г. – 30 мая, наиболее поздняя в 2003 г. – 16 июня. В целом даты появления всходов имеют больший разброс, чем даты посева, а средняя продолжительность периода «посев – всходы» составляет 7 дней.

Средняя температура воздуха вблизи территории МС Барнаул за исследуемый период составила около 17 °C. Минимальная средняя температура воздуха отмечается в 2014 г. и составляет около 13,3 °C. Максимальная средняя температура воздуха отмечается в 2003 г. и составляет около 20,6 °C

Суммы активных температур за представленный период были рассчитаны с учетом биологического минимума гречихи равному 10 °C. Согласно этому средняя сумма активных составила 123 °C.

Среднее количество осадков за текущий период составило 9 мм, наибольшее количество выпавших осадков отмечается в 2007 г. и составляет 18 мм. Минимальное количество выпавших осадков пришлось на 2016 г. составило 0,1 мм.

Показатель суммы дефицитов влажности воздуха в пределах МС Барнаул по годам распределился таким образом, что среднее значение составило 9 мб. Максимальное значение показателя отмечалось в 2006 г. и составило 12 мб. Минимальное значение было зафиксировано в 2007, 2019 и 2020 гг. и составило 7 мб.

Имея данные о сумме активных температур и сумме осадков, можно рассчитать ГТК. Среднее значение ГТК по МС Барнаул за данный период составило – 0,8. Максимальное значение ГТК наблюдалось в 2007 г. и имело значение 1,8. Минимальное значение ГТК наблюдалось в 2007 г. и имело значение 0,01, это связано с маленьким количеством выпавших осадков в данный год. В целом по годам наблюдалось недостаточное увлажнение территории (табл. 2).

Таблица 2
Агрометеорологические условия периода «всходы-появление соцветий» на МС Барнаул

Год	Фазы развития		N дней	T _{ср.} , °C	$\Sigma T_{акт.}$, °C	ΣR , мм	ГТК	Σd , мб	T _{max} , °C
	Всходы	Появ. соцветий							
2003	16.06	26.06	11	20,0	219,6	17	0,8	9	32
2004	14.06	26.06	13	19,9	258,9	61	2,4	8	33
2005	08.06	20.06	13	19,2	249,3	63	2,5	10	36
2006	12.06	26.06	15	20,8	311,7	25	0,8	11	33
2007	14.06	26.06	13	18,4	238,6	21	0,9	8	31
2014	12.06	26.06	15	21,4	321,3	0	0,0	12	32
2016	08.06	24.06	17	19,9	338,9	40	1,2	10	31
2017	08.06	26.06	19	20,3	386,6	27	0,7	10	34
2018	14.06	30.06	17	20,6	350,4	38	1,1	9	32
2019	08.06	02.07	25	17,4	435,4	46	1,1	8	30
2020	30.05	16.06	18	16,0	288,8	21	0,7	8	33

Период «всходы-появление соцветий» является одним из наиболее важных. В этот период в растении происходит процесс заложения и формирования соцветий, при благоприятных условиях данный процесс продолжается до уборки урожая. Показатели условий тепло- и влагообеспеченности в этот период определяют величину будущего урожая.

Средняя дата появления всходов гречихи на территории МС Барнаул приходится на 10 июня. Наиболее ранняя дата посева за исследуемый период отмечается в 2020 г. – 25 мая, а наиболее поздняя в 2003 г. – 9 июня.

В среднем по области появление соцветий на растениях гречихи отмечается 25 июня. Наиболее ранняя дата наступления этой фазы развития наблюдается в 2020 г. – 16 июня, а наиболее поздняя в 2019 г. – 2 июля.

Продолжительность периода «всходы – появление соцветий» в среднем по годам составляет 16 дней. Дольше всего он наблюдается в 2019 г. и составляет 25 дней, а меньше всего в 2003 г. – 11 дней.

Средняя температура воздуха по многолетним данным на территории МС Барнаул за данный период составляет 19,5°C. Максимальное значение по годам в данный период наблюдалось в 2014 г. и составило 21,4 °C, минимальное же наблюдалось в 2020 г. и составило 16,0 °C.

Среднее значение суммы активных температур по территории МС Барнаул за период «всходы – появление соцветий» составляет 309 °C. Среднее значение суммы осадков за период «всходы – появление соцветий» составило 32 мм, наибольшее значение показателя было зафиксировано в 2005 г. и составило 63 мм, а наименьшее наблюдалось в 2014 г. и составило 0,1 мм.

Показатель суммы дефицитов влажности воздуха в пределах МС Барнаул по годам распределился таким образом, что среднее значение составило 9 мб. Максимальное значение показателя отмечалось в 2014 г. и составило 12 мб. Минимальное значение было зафиксировано в 2002, 2007, 2019 и 2020 гг. и составило 8 мб.

Имея данные о сумме активных температур и сумме осадков, можно рассчитать ГТК. Среднее значение ГТК по МС Барнаул за данный период составило – 1,1. Максимальное значение ГТК наблюдалось в 2005 г. и имело значение 2,5, в этот промежуток времени выпало большое количество осадков. Минимальное значение ГТК наблюдалось в 2014 г. и имело значение 0,001. В среднем по годам наблюдалось равенство прихода и расхода влаги вблизи рассматриваемой территории.

Период «появление соцветий – созревание» является критическим для жизни растений гречихи. Наибольшая чувствительность гречихи к низким и высоким температурам наблюдается в фазу цветения. При прогревании воздуха выше 30 °C и относительной влажности ниже 30 % резко ухудшаются условия опыления и оплодотворения из-за малого выделения нектара и его высыхания. При температуре воздуха более 30 °C в тени и 50 °C на поверхности почвы наблюдается «захват» гречихи – отмирание и усыхание многих бутонов, цветков и сформированной завязи. Оптимальные условия в критический период развития гречихи (от начала цветения до созревания) – теплая (16…18 °C) и влажная (более 50 % относительная влажность) погода, при которой формируется наибольший урожай. Агрометеорологические условия периода «появление соцветий – созревание» на МС Барнаул приведены в табл. 3.

Таблица 3
Агрометеорологические условия периода «появление соцветий – созревание» на МС Барнаул

Год	Фазы развития		N дней	T _{ср} , °C	$\sum T_{акт}$, °C	$\sum R$, мм	ГТК	$\sum d$, мб	T _{max} , °C
	Появ. соцветий	Созрев							
2003	26. 06	21. 08	57	18,2	1035,9	69	0,7	8	32
2004	26. 06	18. 08	54	18,5	1001,0	119	1,2	7	34
2005	20. 06	20.08.	62	18,6	1154,9	164	1,4	7	36
2006	26. 06	24. 08	60	20,2	1211,5	119	1,0	9	33
2007	26. 06	23. 08	59	18,8	1074,1	59	0,6	9	32
2014	26. 06	30. 08	66	19,8	1305,2	171	1,3	9	37
2016	24. 06	20. 08	58	19,9	1155,3	142	1,2	7	31
2017	26. 06	18. 08	54	18,8	1013,2	99	1,0	6	31
2018	30. 06	12. 08	44	18,4	808,6	79	1,0	7	32
2019	02. 07	14. 08	44	18,3	889,3	61	0,7	9	34
2020	16. 06	10. 08	56	20,0	1118,2	110	1,0	10	33

В среднем по области появление соцветий на растениях гречихи отмечается 25 июня. Наиболее ранняя дата наступления данной фазы развития наблюдается в 2020 г. – 16 июня, а наиболее поздняя в 2019 г. – 2 июля.

Начало созревания в среднем отмечается 19 августа. Раньше всего начало этой фазы отмечается в 2020 г. 10 августа, позже всего фаза была зафиксирована в 2014 г. 30 августа.

Средняя продолжительность периода «появление соцветий – созревание» составляет 55 дней. Наименьшая продолжительность этого периода была зафиксирована в 2019 и 2020 гг. и составила 44 дня. Наибольшая продолжительность периода была зафиксирована в 2014 г. и составила 66 дней.

Средняя температура воздуха по территории МС Барнаул за исследуемый межфазный период составила 19,0 °C. Наибольшая средняя температура отмечается в 2002 г. и составляет 20,2 °C, а была зафиксирована в 2003 г. и составила 18,2 °C (табл. 4).

Среднее значение сумм активных температур воздуха на исследуемой территории составляет 1069 °C.

Среднее значение суммы осадков за период «появление соцветий – созревание» составило 108 мм, наибольшее значение показателя было зафиксировано в 2014 г. и составило 171 мм, а наименьшее наблюдалось в 2007 г. и составило 59 мм.

Показатель суммы дефицитов влажности воздуха в пределах МС Барнаул по годам распределился таким образом, что среднее значение составило 8 мб. Максимальное значение показателя отмечалось в 2020 г. и составило 10 мб. Минимальное значение было зафиксировано в 2017 г. и составило 6 мб.

Имея данные о сумме активных температур и сумме осадков, можно рассчитать ГТК. Среднее значение ГТК по МС Барнаул за данный период составило –1,0. Максимальное значение ГТК наблюдалось в 2005 г. и имело значение 1,4, в этот промежуток времени выпадало наибольшее количество осадков за исследуемый промежуток времени. Минимальное значение ГТК наблюдалось в 2007 г. и имело значение 0,7. В среднем по годам наблюдалось недостаточное увлажнение территории.

Для данного периода очень важным показателем является T_{\max} . Среднее многолетнее значение составляет 33 °C, что является довольно опасным показателем для периода «появление соцветий – созревание».

Таблица 4
Агрометеорологические условия периода «посев – созревание» на МС Барнаул

Год	Фазы развития		N дней	T_{cp} , °C	$\sum T_{акт}$, °C	$\sum R$, мм	ГТК	$\sum d$, мб	T_{\max} , °C
	Посев	Созрев							
2003	09. 06	21. 08	74	18,7	1380,4	98	0,7	8	32
2004	08. 06	18. 08	72	18,9	1358,8	175	1,3	8	34
2005	02. 06	20.08.	80	19,9	1592,3	180	1,1	9	36
2006	06. 06	24. 08	80	18,7	1497,1	189	1,3	8	33
2007	08. 06	23. 08	77	19,6	1510,8	94	0,6	9	33
2014	06. 06	30. 08	86	19,3	1660,8	182	1,1	9	37
2016	01. 06	20. 08	81	19,7	1597,4	181	1,1	8	31
2017	04. 06	18. 08	76	19,0	1446,6	230	1,6	7	34
2018	07. 06	12. 08	67	19,0	1272,2	94	0,7	8	32
2019	01. 06	14. 08	75	18,9	1420,6	114	0,8	8	34
2020	25. 05	10. 08	78	18,9	1473,8	122	0,8	9	33

Средняя дата посева в среднем по многолетним данным на МС Барнаул отмечается 4 июня. Наиболее ранняя дата наступления данной фазы развития наблюдается в 2020 г. – 25 мая, а наиболее поздняя в 2003 г. – 9 июня.

Начало созревания в среднем отмечается 19 августа. Раньше всего начало этой фазы отмечается в 2020 г. 10 августа, позже всего фаза была зафиксирована в 2014 г. 30 августа.

Средняя продолжительность периода «посев – созревание» составляет 77 дней. Наименьшая продолжительность этого периода была зафиксирована в 2018 г. и составила 67 дней. Наибольшая продолжительность периода была зафиксирована в 2014 г. и составила 86 дней. Средняя температура воздуха вблизи территории МС Барнаул за исследуемый межфазный период составила 19,0 °C. Наибольшая средняя температура отмечается в 2016 г. и составляет 19,7 °C, наименьшая была зафиксирована в 2003 и 2006 гг. и составила 18,7 °C.

Среднее значение сумм активных температур воздуха на исследуемой территории составляет 1474 °C. Среднее значение суммы осадков за период «посев – созревание» составило 151 мм, наибольшее значение показателя было зафиксировано в 2017 г. и составило 230 мм, а наименьшее наблюдалось в 2007 и 2017 гг. и составило 94 мм.

Показатель суммы дефицитов влажности воздуха в пределах МС Барнаул по годам распределился таким образом, что среднее значение составило 8 мб. Максимальное значение показателя отмечалось в 2005, 2007, 2014 и 2020 гг. и составило 9 мб. Минимальное значение было зафиксировано в 2017 г. и составило 7 мб.

Имея данные о сумме активных температур и сумме осадков, можно рассчитать ГТК. Среднее значение ГТК по МС Барнаул за данный период составило –1,0. Максимальное значение ГТК наблюдалось в 2017 г. и имело значение 1,6, в этот промежуток времени выпадало наибольшее количество осадков за исследуемый промежуток времени. Минимальное значение ГТК наблюдалось в 2007 г. и имело значение 0,6. В среднем по годам наблюдалось равенство прихода и расхода влаги вблизи рассматриваемой территории.

Для данного периода важным показателем является T_{\max} . Среднее многолетнее значение составляет 34 °C, что является довольно опасным показателем для периода «посев – созревание».

Анализируя представленные в работе агроклиматические данные, можно сформулировать следующие выводы:

При сравнении дат перехода температур через 0, +5, +10 и +15 °C в весенний и осенний период на МС Барнаул можно заметить устойчивую тенденцию роста, особенно при переходе температур через +10 и +15°C весной и осенью. На данные изменения могут влиять микроклиматические особенности территории;

На протяжении всех периодов относительно среднемноголетних значений за 30 лет 1961–2020 гг. сумма температур, наблюдавшаяся вблизи МС, неуклонно росла, также как и сумма осадков;

При анализе отклонений дат перехода температур через 0, +5, +10 и +15°C на МС Барнаул можно отметить увеличение данных периодов.

Список литературы

1. Авдеев С. М. Биоклиматический потенциал в условиях глобального изменения климата // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ : Сб. тез. Междунар. науч.-практ. Конф., посвящ. 90-летию Рос. гос. гидрометеорол. ун-та, Санкт-Петербург, 22–24 окт. 2020 г. СПб. : Рос. гос. гидрометеорол. ун-т, 2020. С. 100–102.
2. Важов В. М., Козил В. Н., Одинцов А. В. Гречиха в лесостепи Алтая : монография. Бийск : АГАО, 2012. 204 с.
3. Гнатовский В. М. Некоторые пути адаптации земледелия сухостепной зоны Алтайского края к климату и почвам // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2010. № 11(73). С. 5–9.

УДК 630:551.5

Агроклиматическая оценка условий возделывания озимой пшеницы по данным наземных и спутниковых наблюдений в Белгородской области

И. Ф. Асауляк (iasaulyak@rgau-msha.ru), С. М. Авдеев (avdeev@rgau-msha.ru),
Е. А. Дронова (edronova@rgau-msha.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева», Москва

Аннотация. Основной целью работы является оценка влияния агрометеорологических факторов на условия вегетации озимой пшеницы с использованием наземных и спутниковых данных. Научная новизна исследования заключается в оценке агроклиматических условий вегетации озимой пшеницы в Белгородской области на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. Научная и практическая значимость работы заключается в том, что проведен анализ современной системы мониторинга состояния растительности по наземным и спутниковым данным, исследованы связи урожайности озимой пшеницы с данными спутниковых измерений и наземных агрометеорологических наблюдений, сопоставлены результаты мониторинга состояния озимой пшеницы по наземным и спутниковым данным.

Ключевые слова: температура, осадки, урожайность.

Озимая пшеница является наиболее значимой зерновой культурой в сельском хозяйстве. Зависимость сельскохозяйственного производства от метеорологических условий довольно сложная. Не существует таких условий, одинаково благоприятных для всех возможных выращиваемых культур. Оценка влияния изменений климата на урожайность сельскохозяйственных культур позволяет решить ряд задач, таких как: определение оптимальных сроков сева, оптимизация сортового состава возделываемых сельскохозяйственных культур, оценка вероятности повреждения растений от различных факторов среды. Существует большое количество методов оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур, основывающихся в основном на данных наземных агрометеорологических наблюдений. Однако наземная информация о состоянии растений не всегда обеспечивает требуемую точность на больших площадях. Для более точного анализа используется спутниковая информация. Спутниковая информация дает возможность получать данные по любой требуемой территории. Особенно важно наличие таких данных в отдельные периоды вегетации, когда наблюдаются наибольшие изменения агрометеорологических параметров состояния посевов.

В целях исследования условий вегетации озимой пшеницы в Белгородской области по наземным данным была проведена систематизация метеорологических параметров и данных по урожайности культуры с 2003 по 2016 г. за весенне-летний период (апрель-июнь, основной период вегетации).

Спутниковая информация включала значения индекса NDVI по неделям вегетации, максимально приближенная к декадным значениям, за указанный период. NDVI – это стандартизованный индекс, показывающий наличие и состо-

жение растительности (относительную биомассу). Этот индекс использует контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных – поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительного сырья в инфракрасном канале). Различное отражение в красном и инфракрасном (IR) каналах позволяет контролировать плотность и интенсивность роста зеленой растительности с использованием спектрального отражения солнечной радиации. Зеленые листья обычно показывают лучшее отражение в ближнем диапазоне инфракрасных длин волн, чем в диапазонах видимых длин волн. Если листья подавлены водой, увядающие или мертвые, они становятся более желтыми и отражают значительно меньше в ближнем инфракрасном диапазоне.

Для установления тесноты связей агрометеорологических параметров с индексом NDVI и последующего сопоставления выбранных данных с урожайностью озимой пшеницы, были построены матрицы связей.

Среди отобранных показателей, хорошо коррелирующих с вегетационным индексом NDVI, был выбран гидротермический коэффициент (ГТК), который соответствует следующим условиям:

а) возможность использования стандартной информации, поступающей по коду КН-21;

б) удобство расчетов;

в) достаточная информативность.

ГТК рассчитывался по формуле:

$$ГТК = \frac{\sum R}{0,1 \sum T}, \quad (1)$$

где ГТК – гидротермический коэффициент за период не менее месяца; $\sum R$ – сумма осадков, мм; $\sum T$ – сумма температур (выше 10 °C) за этот же период, °C, уменьшенная в 10 раз и отражающая испаряемость.

Для оценки условий вегетации озимой пшеницы был проведен анализ агрометеорологических параметров – температуры воздуха, осадков, ГТК, запасов продуктивной влаги в пахотном слое почвы, в годы, с различными условиями увлажнения.

Наибольшее влияние на урожайность озимой пшеницы оказывают агрометеорологические условия мая – июня. Например, в годы, когда, в этот период наблюдаются сильные атмосферные засухи (значение ГТК равно 0,60 и менее), урожайность озимой пшеницы снижается на 25–40 % [1; 2].

Для оценки влияния атмосферной засухи на снижение урожайности озимой пшеницы были определены статистические модели связей урожайности с ГТК за май. Были рассчитаны линейные уравнения этих связей типа ($y = a + bx$). Коэффициенты корреляций полученных уравнений составляют по большинству областей от 0,43 до 0,66. Рассчитанные статистические модели зависимости урожайности озимой пшеницы от гидротермического коэффициента позволили определить, что при низких значениях ГТК, урожайность озимой пшеницы снижается.

Выявлена прямая связь урожайности озимой пшеницы и показателя NDVI посевов. Чем ниже показатель NDVI, тем урожайность меньше. Скорость прироста и снижения значений NDVI во время вегетации зависит от метеоусловий текущего года. В условиях жаркой погоды значения NDVI не достигают возможного максимума и, следовательно, урожай будет меньше. Для примера эти связи представлены графически на рис. 1.

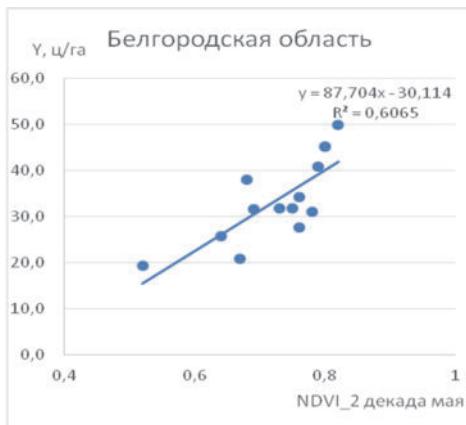


Рис. 1. Зависимости урожайности озимой пшеницы в ц/га (Y) от ГТК в Белгородской области

Изучив зависимости урожайности озимой пшеницы от агрометеорологических факторов и индекса NDVI, можно говорить о возможности комплексного анализа условий вегетации озимой пшеницы с использованием наземной информации и спутниковых данных.

Так, в засушливые (например, 2010 г.) и оптимальные по условиям увлажнения годы (например, 2008 г.) урожайность в Белгородской области 20,7 и 45,2 ц/га соответственно.

Причина такой ситуации в значительной степени объясняется различиями в агрометеорологических условиях. В Белгородской области в начале июня наблюдалось уменьшение осадков (9,9 мм по сравнению со среднемноголетним за этот период 23,9 мм), однако влаги, накопленной в начале месяца, хватило для формирования урожая. Вегетационный индекс NDVI изменяется весь сезон и его значения различны во время роста, цветения и созревания растений. В начале вегетационного сезона сельскохозяйственные растения накапливают зеленую биомассу, и индекс нарастает, достигая максимума в июне, в момент цветения его рост останавливается, затем по мере созревания, NDVI снижается. В зависимости от почвенного плодородия, метеоусловий и технологии возделывания посевов скорость развития биомассы будет разной. Поэтому по среднему значению NDVI на поле легко сравнивать состояние посевов во время вегетации: на одних полях посевы развиваются быстрее (лучше), на других – медленнее (хуже). С

другой стороны, снижение значений NDVI в период активной вегетации свидетельствует о стрессовом состоянии посевов.

Наиболее тесная взаимосвязь между урожайностью и NDVI наблюдается в момент прохождения пика значения NDVI. Например, для посевов озимой пшеницы при возделывании по интенсивной технологии, значение NDVI во время пика достигает 0,80–0,88. Пик NDVI обычно приходится на момент начала фазы колошения. Если в фазу колошения NDVI достигает значения всего 0,60–0,65, то это значит, что урожайность будет ниже максимальной на 25–30 %.

По данным, полученным с веб-сервиса ВЕГА за период с 2003 по 2016 г., были сформированы массивы значений NDVI в весенне-летней период вегетации озимой пшеницы и рассчитаны средние многолетние значения этого показателя по декадам для Белгородской области (рис. 2).

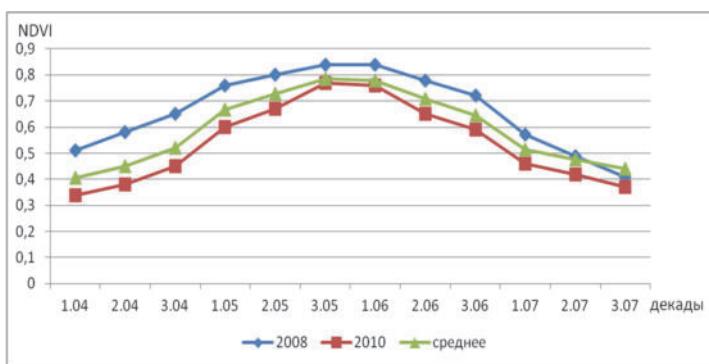


Рис. 2. Динамика NDVI по декадам весенне-летней вегетации озимой пшеницы по Белгородской области

В Белгородской области, как и в 2010, так и в 2008 г. наибольшие значения NDVI отмечаются в срок (конец мая – начало июня). Но в то же время, в более благоприятный 2008 г., максимум NDVI составил 0,84, а в 2010 г. – 0,79, что в обоих случаях характеризует поле с густой растительностью. При этом ГТК в 2008 г. составил 1,1(оптимальное увлажнение), а в 2010 г. – 0,9 (недостаточное увлажнение).

Таким образом в данной работе – сопоставлена оценка условий вегетации озимой пшеницы с использованием дистанционных методов и данных наземных наблюдений с сети станций Росгидромета по Белгородской области с 2003 по 2016 г.; представлен обзор мониторинга состояния растительности по спутниковым данным (вегетационные индексы); показана актуальность проведения анализа данных дистанционных наблюдений совместно с метеоинформацией; создана погодичная специализированная база данных метеорологических параметров и данным по урожайности озимой пшеницы с 2003 по 2016 г.; проведен анализ влияния агрометеорологических параметров (ГТК, запасы продуктивной влаги в пахотном слое почвы) на урожайность культуры в Белгородской области

в засушливые годы и в годы с достаточным увлажнением; были рассчитаны матрицы парных коэффициентов корреляции между урожайностью озимой пшеницы, агрометеорологическими параметрами и данными вегетационного индекса NDVI.

Список литературы

1. Практикум по агрометеорологии и агрометеорологическим прогнозам / А. И. Бело-любцев, В. А. Сенников, И. Ф. Асауляк, Л. Н. Коровина, С. М. Авдеев. Транслог, 2015. 284 с.
2. Страшная А. И. Состояние и проблемы оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства на федеральном уровне в условиях глобального изменения климата // Труды ВНИИСХМ. 2007. Вып. 36. С. 78–91.
3. Страшная А. И. Исследование засух и их влияния на урожайность зерновых культур в Российской Федерации. Научный отчет Гидрометцентра России. М., 2000. 19 с.
4. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности (Веб-сервис «ВЕГА»). URL: <http://pro-vega.ru> (дата обращения: 25.10.2022)

УДК 551.4.022+551.328

Научный полигон Анмангындинская наледь: комплексный подход изучения процессов водообмена

А. А. Землянская (a.zemlyanskova@spbu.ru)¹, О. М. Макарьева (omakarieva@yandex.ru)¹, А. Н. Шихов (and3131@inbox.ru)², Н. В. Нестерова (nnesterova1994@gmail.com)^{1,3}, А. А. Осташов (andrey.ostashov@gmail.com)^{1,4}, В. Р. Алексеев (avr@crust.irk.ru)⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

³Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

⁴Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Якутск

Аннотация. Для изучения процессов водообмена горной криолитозоны в изменяющемся климате в Магаданской области на территории бассейна р. Анмангында, в котором формируется гигантская наледь подземных вод, развернут комплекс междисциплинарных исследований. Собраны архивные материалы наблюдений этого района, а также массив спутниковых снимков. Проводятся наблюдения за стоком реки, формирующей наледь, метеорологическими и геокриологическими параметрами. Выполняются геологические и геофизические работы, ландшафтное профилирование. Главные результаты получены по результатам геофизических съемок наледной поляны. Данные показывают, что Анмангындинская наледь образуется в результате выхода подземных вод по восходящим каналам фильтрации из аллювия под лед. Наблюдается значительное сокращение максимальных размеров наледи, что свидетельствует о стадии регрессии объекта (затухании его развития). Полученные данные являются уникальными, их анализ позволит оценить состояние природных систем криолитозоны Магаданской области в современном климате. На основе полученного опыта могут быть разработаны рекомендации по организации исследований на подобных объектах.

Ключевые слова: оформление статьи, параметры страницы, список литературы.

Введение

Для стран, где распространена многолетняя мерзлота, одним из острых вопросов стоит изучение реакции мерзлоты на изменение климата [6]. Долгосрочные наблюдения на научных полигонах (стационарах) с междисциплинарными программами исследований должны стать основой для изучения и прогноза поведения криолитозоны. Гигантские наледи подземных вод распространены на территории России, Канады, Аляски, и др. Наледи представляют собой поля льда, которые образуются посредством послойного намораживания поверхностных или подземных вод. В речных бассейнах они выполняют функцию перераспределения стока с зимнего периода на весенне-летний. В криолитозоне мира они являются неотъемлемой частью системы водообмена. Поэтому хотя бы один стационар должен быть организован в бассейне реки, в которой формируются гигантские наледи.

В России на территории Дальнего Востока в 1962–1991 гг. функционировал Анмангындинский наледный полигон. На нем проводились режимные наблюдения за формированием стока р. Анмангында (площадь бассейна 376 км²), изучался гидрохимический состав вод и льда, основным направлением было наблюдение за динамикой толщины, площади и объема льда [5]. С 1992 по 2019 г. данные отсутствуют, так как работы были прекращены, но в 2020 г. сотрудниками Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН и Санкт-Петербургского государственного университета они были возобновлены.

Целью настоящей работы является организация междисциплинарных исследований на Анмангындинской наледи (рис. 1).

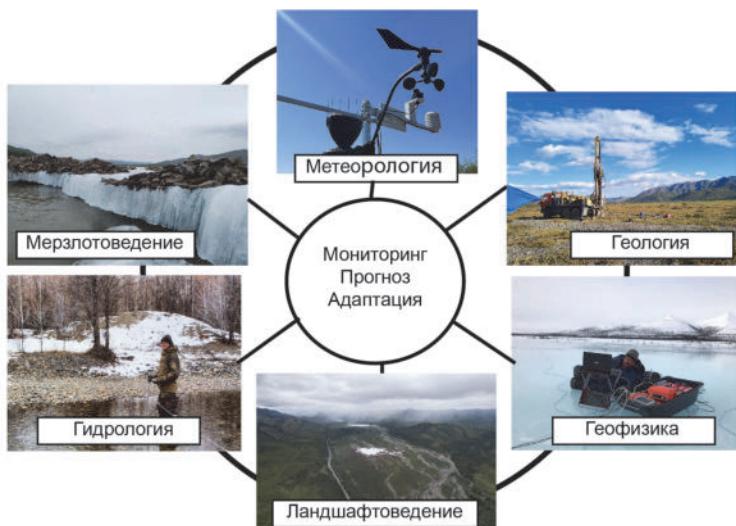


Рис. 1. Междисциплинарные наблюдения 2020–2022 г. на Анмангындинской наледи

Объект исследования

Анмангынданская наледь расположена в бассейне р. Анмангында (правый приток р. Детрин, верховье бассейна р. Колыма). Перепад высот составляет 700–1850 м. Ландшафт представлен видами, характерными для зон тундры и лесотундры, на склонах произрастает лиственничный лес на мохово-лишайниковой подстилке, верховья сложены гольцами. Мощность многолетнемерзлых пород достигает 200 м, в долине реки уменьшается и прерывается таликовыми зонами [1]. Территория исследования характеризуется суровым климатом, средняя годовая температура воздуха $-9,8^{\circ}\text{C}$, количество осадков 341 мм (м/с Усть-Омчуг, 1967–2021 гг.) [3].

Задачи и методы исследования

Возобновление режимных наблюдений за изменением стока р. Анмангында. В исторический период времени функционировало два гидрологических поста, результаты наблюдений вошли в гидрологические ежегодники Колымского управления гидрометеорологической службы. Один был расположен ниже наледи (159-й км Тенькинской трассы), второй – на крупном притоке р. Анмангында – р. Ольchan. В настоящее время в районе этих гидрологических постов наблюдения за уровнем воды ведутся с помощью автоматизированного логгера давления, а наблюдения за расходом воды производятся в теплый период года несколько раз в неделю, зимой русло перемерзает, а сверху образуется наледь, поэтому наблюдения за стоком круглый год не ведутся. Постоянный гидрологический пост оборудован выше Анмангынданской наледи (ГП-1, рис. 2) и в средней части наледной поляны (База Лагерь). В этих створах сток реки осуществляется круглый год, поэтому измерение расхода в зимний период производится один раз в месяц, а в летний – по учащенной программе.

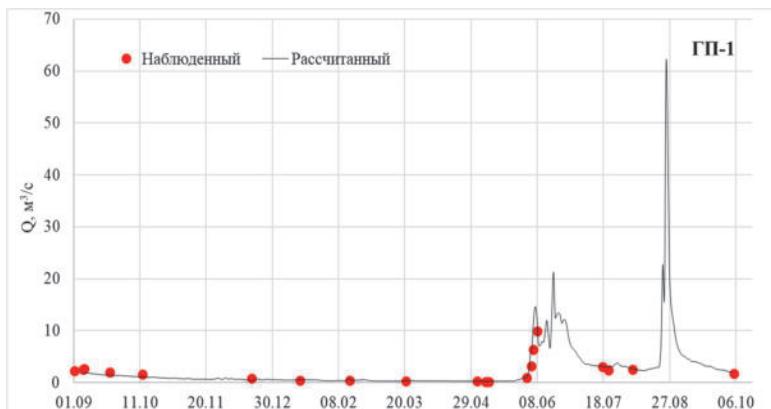


Рис. 2. Гидрограф стока по данным створа выше наледи

Возобновление мониторинга гидрометеорологических параметров. В разных частях бассейна р. Анмангында установлены автоматические метеорологические станции (м/с База лагерь, м/с Солонцовский, м/с Ольчан скважина), осуществляющие сбор информации о температуре и влажности воздуха, а также давлении с часовым интервалом. Для получения информации об осадках в теплый период времени устанавливаются автоматические осадкомеры. Решить вопрос по автоматическому определению количества твердых осадков пока не удалось. В 2022 г. для наблюдения за снежным покровом в различных частях водо-сбора установлены снегомерные рейки и фотоловушки, с 2021 г. действует снегомерная подушка.

Наблюдения за динамикой толщины, площади и объема наледи. В исторический период исследование внутригодового и межгодового изменения характеристик Анмангындской наледи осуществлялось наземными методами. По всей наледной поляне, размеры которой по современным оценкам составляют 7.6 км² [7], были установлены наблюдательные вешки, по которым определялась толщина льда и конфигурация площади наледи. После эти сведения наносились на картографическую основу и с помощью планиметрирования вычислялась площадь, объем определялся, как произведение площади на среднюю толщину льда.

В настоящее время для определения границ наледи, площади льда и изучения наледных явлений и процессов (буторы пучения, разветвление русел и др.) используются методы дистанционного зондирования Земли и обработка массива фотоматериала, полученного с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Авторами собраны данные спутниковых снимков Landsat (2000–2017 гг., 52 шт.) и Sentinel (2018–2021 гг., 84 шт.), БПЛА-съемок (2020–2022 гг., 8 шт.). Для определения максимального объема льда используется расчетная формула [2], выведенная по историческим данным (1962–1991 гг.) площади и объема льда, а также применяются данные БПЛА, оборудованного высокоточной AGNSS системой (точность для толщины льда ± 5 см).

В качестве наземного метода исследования проводится нивелирование земной поверхности. В начале возобновления наблюдений использовался стандартный нивелир Leica и нивелирная рейка, а с конца мая 2021 г. используется система GNSS приемников, позволяющие получать точность в дискретных точках до 1 см. На наледной поляне для изучения динамики толщины льда было выбрано от 3 до 10 профилей (рис. 3). Результаты съемки позволяют также определять коэффициенты нарастания и стаивания льда.

Состав поверхностных и подземных вод. Отбор проб воды для определения ее гидрохимического состава осуществляется с 2020 г. Пробы отбираются на всех гидрологических постах, расположенных в бассейне р. Анмангында, из наблюдательных гидрогеологических скважин, бугров пучения, а также притоков. Также во всех ранее перечисленных пунктах производится отбор проб воды на изотопный, осуществляется сбор жидких и твердых осадков, наледного льда. С помощью кондуктометра определяется минерализация речных вод и температура. С мая 2022 г. пробы воды также отбираются на анализ органического вещества (углерод, азот).

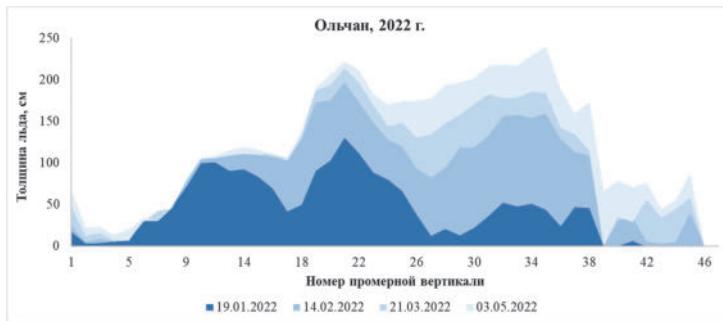


Рис. 3. Динамика толщины наледи за 2022 г. на профиле Ольchan

Геофизические методы исследования. Первая геофизическая съемка наледной поляны Анмантындинской наледи была выполнена в 1966 г. в четырех точках методом вертикального электрического зондирования. Однако из-за аллювиальных отложений введение электродов было достаточно трудоемкой задачей. В связи с этим создались существенные поверхностные неоднородности, которые так или иначе исказили форму кривых ВЭЗ. За два (2021–2022 гг.) года реализации междисциплинарного проекта по исследованию наледей были проведены разномасштабные геофизические работы, среди них георадиолокация, бесконтактное электропрофилирование [4], зондирование становлением поля в ближней зоне и электротомография. Каждый метод имеет свою глубинность, комплексный анализ результатов дает возможность уменьшить неоднозначность интерпретации данных.

Первые результаты

По результатам анализа исторических сведений и данных спутниковых снимков о площади наледи установлено, что в настоящее время в период наибольшего развития наледи ее размеры на 25 % меньше, чем в прошлом веке. Ареалы формирования максимальной толщины льда сместились на 1 км вверх по руслу, что способствовало угасанию наледных явлений на части наледной поляны.

Сезонное разрушение наледи ускорилось в среднем на 34 дня ввиду значительно меньших максимальных размеров, а также из-за повышения температуры воздуха в летние месяцы.

В 2021 г. наибольшая измеренная толщина наледи была 4,40 м в верхней части наледной поляны, максимальная скорость прироста льда в сутки составила 4,8 см в феврале. Разрушение наледи происходило постепенно, сначала освободилась нижняя часть (в начале июля), позже и вся площадь наледной поляны. Наледь растаяла полностью к 6 сентября. В 2022 г. величина толщины наледи была значительно ниже измерений предыдущего года. Так, в одной из точек в нижней части наледной поляны наибольшая толщина льда была 3,46 м. При этом наибольшая средняя величина по всему профилю наблюдалась в верхней ее ча-

сти и составила 2,30 м. В среднем прирост льда в сутки составил 1,5 см, а максимальное увеличение 4,4 см. На одном из профилей, где средняя толщина льда на начало мая была 1,54 м, лед полностью растаял в первую неделю июля. Полностью наледная поляна освободилась ото льда в начале августа 2022 г. Из-за того, что межгодовая изменчивость наледи очень высокая, необходимо проводить длительные наблюдения, чтобы определить какие факторы в большей степени оказывают влияние на развитие наледных процессов.

Результаты геофизических методов исследования показали, что в период образования наледи происходит разгрузка подземных вод из аллювия под лед. В ледяной толще могут находиться незамерзшие линзы воды. Вне границ русел реки глубина сезонно-мерзлого слоя остается практически постоянной, несмотря на разную толщину льда на поверхности. Определены границы подрусловых и промерзающих таликов.

Комплексирование георадиолокационных данных и данных бесконтактного электропрофилирования показало хорошую сходимость результатов, что позволило уменьшить неопределенность в интерпретации данных.

Заключение

Впервые за последние тридцать лет в Магаданской области проведены междисциплинарные работы по изучению процессов наледеобразования. Установлены мерзлотно-геологические условия наледной поляны. Выявлено значительное сокращение размеров наледи, а также увеличение скорости ее разрушения в теплый период года. Научный полигон позволяет отработать разные техники и методы исследования объекта, сравнить полученные результаты. Необходимо продолжить исследования, а именно осуществить бурение глубоких скважин для заверки результатов по геофизике.

Коллектив авторов искренне благодарит Главу Тенькинского городского округа Магаданской области Дениса Анатольевича Ревутского за помощь в проведении исследований и обеспечении работы научной группы на территории округа. Исследования проводятся при поддержке РФФИ – проекты 20-05-00666, 19-55-80028, РГО «Водные ресурсы Северо-Востока России в условиях региональных и глобальных изменений» и Санкт-Петербургского государственного университета (проект 75295776, 92670123).

Список литературы

1. Букаев Н. А. Основные закономерности режима гигантских наледей в верховых р. Колымы (на примере Аянмангындинской наледи) // Наледи Сибири. М. : Наука, 1969. С. 62–78.
2. Многолетняя динамика гигантской Аянмангындинской наледи на северо-востоке России (1962–2021 гг.) / А. А. Землянская, В. Р. Алексеев, А. Н. Шихов, А. А. Осташов, Н. В. Нестерова, О. М. Макарьева // Лед и Снег. – В печати.
3. Метеорологический ежемесячник. Колымское управление гидрометеорологической службы. Магадан : Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. Колымское упр. гидрометеорологической службы. Магадан : Магадан. гидрометеорол. обсерватория, 1966–2021 гг. Вып. 33.
4. Результаты георадиолокационных и электрических зондирований гигантской наледи подземных вод на р. Аянмангында (Магаданская область) / В. В. Оленченко, О. М. Макарьева, К. П. Данилов, А. А. Осташов, А. С. Калганов, А. А. Землянская, И. И. Христофоров, Н. В. Нестерова // Сборник до-

кладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М. В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. М. : КДУ : Добросвет, 2022. С. 420–426.

5. Отчет по результатам воднобалансовых исследований с наледной составляющей в бассейне р. Аянмангынды. Магадан: Колымское управление гидрометеорологической службы, 1977. – 62 с.

6. The distribution and dynamics of aufeis in permafrost regions / Ensom T. P., Makarieva O. M., Morse P. D., Kane D. L., Alekseev V. R., Marsh P. // Permafro. Periglac. Process. 2020. Vol. 31. P. 383–395.

7. Perspectives of the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia / Makarieva O. M., Nesterova N. V., Ostashov A. A., Zemlyanskova A. A., Tumskoy V. E., Gagarin L. A., Ekaykin A. A., Shikhov A. N., Olenchenko V. V., Khristoforov I. I. // Vestnik of SPbSU. Earth Sciences. 2021. Vol. 66, N 1. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.105>

УДК 598.2:[591.9+551.583]

Фауна птиц Восточной Сибири: потепление климата и его последствия

Ю. И. Мельников (yumel48@mail.ru)

Байкальский музей СО РАН, Иркутской обл. р. п. Листвянка

Аннотация. На основе многолетних исследований (1968–2022 гг.) изучены материалы по изменению распространения и границ ареалов птиц Восточной Сибири, связанные с хорошо выраженным потеплением климата, обусловленном резким повышением солнечной активности с последующей сменой зонального переноса воздушных масс на меридиональный. Показано, что по сравнению с соседними районами, наблюдается более сильное потепление – в 2,7 раза, чем в среднем по Северному полушарию Земли. Потепление было очень неравномерным и разные районы очень сильно отличаются друг от друга по данному показателю. Кроме того, в высокогорье уровень потепления практически в два раза ниже, по сравнению с равнинами и долинами крупных рек. Сильные засухи и долговременные маловодные периоды, характерные для второй половины XIX столетия в Центральной Азии, вызвали массовые выселения птиц к северу. Однако хорошо были выражены западный и восточный потоки их расселения во время которых наблюдалось преодоление Байкальской зоogeографической границы. В результате сформировались новые ареалы птиц, во многих случаях, закрывшие разрывы, существовавшие, вероятнее всего, с конца плейстоцена. Сделан вывод, что в настоящее время Восточная Сибирь стала ареной существенной перестройки ареалов птиц и данный процесс продолжается до сих пор.

Ключевые слова: Восточная Сибирь, потепление климата, птицы, фауна, Байкальская зоогеографическая граница, современное распространение птиц.

Введение

Фауна птиц Восточной Сибири на достаточно длинных исторических отрезках времени постоянно менялась. Это хорошо видно на примере крупных обзоров птиц, подготовленных в XIX–XXI столетиях [1; 5; 15–16]. Основная причина изменений на последних этапах ее изучения, когда были собраны основные материалы по фауне птиц Восточной Сибири – потепление климата, начавшееся с середины XIX столетия (после Малого Ледникового периода Европы). В России оно долгое время прослеживалось очень слабо, хотя уже в первой половине

прошедшего столетия (30-е гг.) были отмечены изменения в ареалах птиц Средней Сибири [13]. К концу первой половины XX столетия эти изменения уже были значительными и в Восточной Сибири было отмечено 57 новых видов птиц, встречавшихся, преимущественно, только залетом [1; 15]. Во второй половине XX столетия темпы потепления резко увеличились. Начиная с конца 50-х – начала 60-х гг. этого периода наблюдались массовые выселения птиц к северу из Центральной Азии, шедшие с различных направлений. Причины этого рассмотрены в нескольких специальных публикациях [5–6; 15]. В данной работе приводятся материалы последних исследований, показывающие процессы формирования современной фауны птиц Восточной Сибири под влиянием очень сильных климатических изменений.

Район работ, материал и методика

Восточная Сибирь, преимущественно, горная страна с очень хорошо развитой речной сетью (рис. 1), но относительно небольшим, за исключением самых южных районов, количеством равнинных пространств. Ее озерность незначительна и крупных озер естественного происхождения очень мало. Повсеместно преобладают небольшие термокарстовые озерно-болотные экосистемы, расположенные в долинах небольших рек и ключей. Современное потепление региона является очень сильным, что резко выделяет его на фоне общих изменений климата в Северном полушарии Земли. Однако и в Восточной Сибири потепление было неравномерным. Здесь резко выделяется территория, отличающаяся своеобразными климатическими условиями – Забайкальская природная территория (геоэкологическое ядро Евразии) [8]. В этом регионе значительно ослабевают, а иногда и затухают воздушные потоки, идущие с Атлантического и Тихого океанов, Арктики и южных смежных территорий. Орографические барьеры, представленные хребтами Восточного Саяна, Байкальским, Хамар-Дабанским и Баргузинским хребтами, заметно снижают уровень увлажнения северо-западных воздушных потоков (Атлантика). Кроме того, насыщенные влагой тихоокеанские муссоны ослабляются хребтами Олекминского Становика и Большого Хингана. Воздушных потоков, несущие большое количество влаги с Северного Ледовитого океана, теряют ее на склонах Байкало-Патомского нагорья, Северо-Муйского и Кодарского хребтов, что сильно увеличивает засушливость данной территории [8].

Особенности орографии данного очень крупного географического региона приводят к тому, что Забайкалье располагается в зоне дождевой тени и пониженного осадкоформирования [8]. В продолжительные и сильные засушливые периоды эти процессы распространяются и на Предбайкалье. Именно поэтому, Восточная Сибирь в настоящий период рассматривается как единый регион. Исходная повышенная засушливость этой территории резко выделяет ее из общей системы регионов северного полушария Земли. Здесь процессы изменения природных экосистем под влиянием общего потепления климата шли более высокими темпами. Это позволяет достаточно быстро выявить особенности развития природных процессов на начальных этапах сильных преобразований изучаемых территорий.

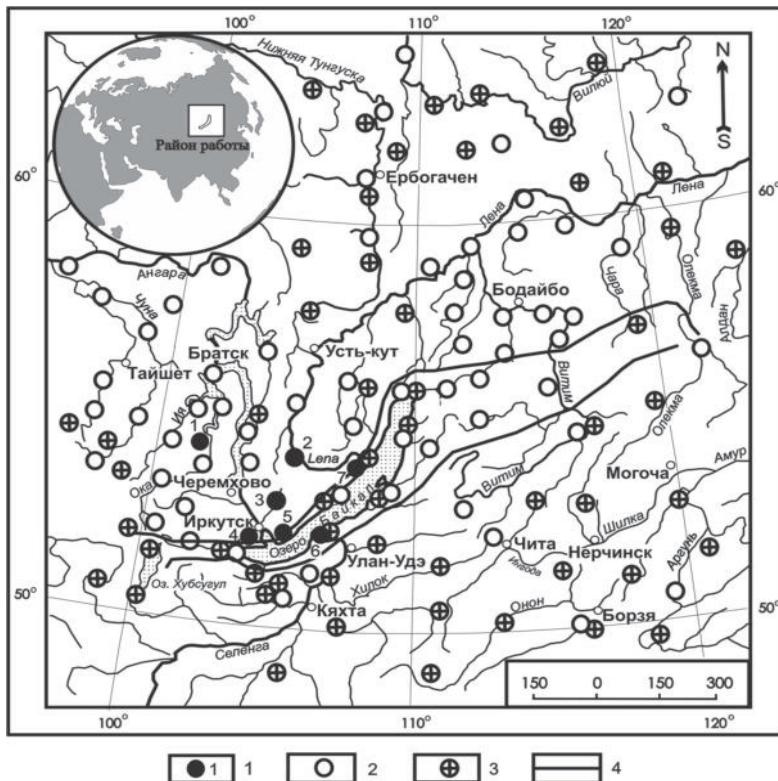


Рис. 1. Интенсивность обследования Восточной Сибири в XX и начале XXI столетий:
1 – районы стационарных исследований автора (1 – Барлукско-Саянская пойма р. Оки, 2 – верхнее течение р. Лена, 3 – пойма р. Куда (Иркутско-Черемховская равнина), 4 – устье р. Иркут, 5 – правобережье истока р. Ангары, 6 – дельта р. Селенги, 7 – Байкало-Ленский государственный природный заповедник), 2 – районы кратковременных обследований автора, 3 – районы экспедиционных работ и стационарных исследований разных авторов, 4 – границы Байкальской рифтовой зоны

Котловина оз. Байкал делит Восточную Сибирь на две части: Предбайкалье и Забайкалье. Вместе с прилегающими хребтами она формирует Байкальскую рифтовую зону, общей протяженностью около 2000 км. Здесь формируется крупный географический барьер, который является Байкальской зоогеографической границей в распространении птиц. В настоящее время, отличающееся значительным потеплением климата, процессы их расселения определяются сильными засухами и продолжительными маловодными периодами, развивающимися в Центральной Азии. Массовые выселения птиц к северу, а также западный и восточный потоки их расселения значительно изменяют состав фауны птиц Восточной Сибири, однако эти процессы до сих пор изучены очень плохо.

Специальные длительные исследования проводились нами на семи стационарах, расположенных в разных районах Восточной Сибири (рис. 1). Наиболее продолжительные работы выполнены на Барлукско-Саянском участке (1) среднего течения р. Оки (более 20 лет), на верхнем участке долины р. Лены (2) (пять лет), в долине р. Куды (3) (пять лет), устье р. Иркут (4) (пять лет), на правобережье истока р. Ангары (5) (13 лет), дельте р. Селенги (6) (непрерывно 10 лет, а затем периодические наблюдения в течение 20 лет), и на северо-западном побережье оз. Байкал в Государственном природном заповеднике «Байкало-Ленский» (7) (10 лет).

Очень продолжительные исследования птиц котловины озера Байкал (практически всю вторую половину XX в.) проводились на байкальских стационарах НИИ биологии при Иркутском госуниверситете, сотрудниками Бурятского государственного университета и Бурятского научного центра СО РАН. Нельзя не отметить значительный вклад в изучение птиц Восточной Сибири орнитологами различных заповедников и национальных парков Восточной Сибири: Баргузинский, Байкало-Ленский, Байкальский, Витимский, Джергинский заповедники и Прибайкальский, Забайкальский и Тункинский национальные парки (рис. 1). Кроме того, широко использовались экспедиционные исследования с использованием различных видов транспорта и способов наблюдений и отбора полевого материала. Такими обследованиями охвачена вся территория Восточной Сибири (рис. 1). Точки наблюдений достаточно равномерно покрывают весь регион и это позволяет считать, что полученная картина выселения птиц действительно отражает реально сложившуюся ситуацию (рис. 1).

В работе использовались общепринятые методы исследований, адаптированные к местным условиям. В процессе обработки полевого материала применялись общепринятые методы их статистического анализа (с преимущественным использованием непараметрических методов) [11]. Собственные материалы (1968–2022 гг.) дополнены литературными источниками, касающимися этого региона (в основном местными обобщающими и дополняющими фаунистическими работами). Современный состав фауны птиц сравнивался с данными за первую половину XX столетия [1; 5–6; 15]. Это позволило точно выяснить изменения в ее структуре, произошедшие в период хорошо выраженного потепления климата. Точка на карте означает находку птиц (одиночной особи, пары, небольшой группы или стаи) конкретного нового вида, зарегистрированного на определенном направлении выселения (с запада или востока) за пределами прежней границы ареала. Учитывались только наиболее удаленные, но характерные находки из серии встреч любого нового вида. Встречи вида только однажды также отмечены на представленной карте (рис. 2). Северное направление специально не выделялось, поскольку для всех видов, в той или иной степени, было характерно смещение границ ареалов к северу. Названия птиц, порядок их описания и объем видов по родам и семействам приведены по последним орнитологическим сводкам России и Сибири [3; 12].

Результаты

Общее потепление климата после Малого Ледникового периода начало отмечаться в Европе с середины XIX века, но в России оно долгое время прослеживалось очень слабо и еще первая половина XX столетия расценивалась рядом авторов как современное позднеледниковые [7]. Однако уже в это время в Средней Сибири заметно проявилось продвижение ареалов птиц на север [12]. На Южном Байкале в ходе температуры воздуха также отмечается слабая тенденция к ее увеличению, начиная с середины 30-х гг. XX столетия [14]. Во второй половине этого столетия уровень потепления стал стремительно возрастать. Основная причина этого, резкое повышение солнечной активности в начале прошедшего столетия, сопровождающееся сменой направлений атмосферной циркуляции – широтный обмен воздушных масс сменился на меридиональный [2]. В результате этого в Восточной Сибири, находящейся практически в центре Азии, уровень потепления резко повысился – в среднем 1,9°/100 лет, в то время как средний уровень потепления на всем Северном полушарии Земли составлял 0,7°/100 лет [2; 9; 10; 14]. Однако распределение температур по региону было очень неравномерным. Наиболее высокие средние температуры приземного слоя воздуха наблюдались на юге Забайкалья – 2,2°/59 лет, а наиболее низкие в высокогорье Баргузинского хребта – 1,0°/ 100 лет [10]. Немаловажным является и то, что в долинах рек отмечаются значительно более высокие температуры приземного слоя воздуха.

Анализ современной ситуации, связанной с распределением новых видов птиц по территории, показывает большие различия в интенсивности западных и восточных миграционных потоков (рис. 2). Прежде всего, обращает на себя внимание очень высокая неравномерность распределения новых видов птиц по территории. Явно выделяется несколько участков с более высоким количеством регистраций новых видов. По долинам рек Оки и Ангары проходят крупные миграционные потоки Байкало-Ангаро-Енисейского направления, что резко увеличивает видовое разнообразие птиц и количество обнаруженных здесь новых видов [5; 15]. В этом плане резко выделяется Селенгино-Байкальский и Байкало-Ангарский пути миграций (рис. 2). Довольно интенсивным является и Иркутно-Ангарский миграционный поток, что особенно хорошо видно в ранневесенне время. Остальные миграционные направления птиц представлены новыми видами значительно беднее. Собственно, основное количество зарегистрированных новых видов птиц сосредоточено в районе Южного Байкала. Именно здесь всегда проводились наиболее интенсивные работы и были расположены стационары, специально организованные для их детальных исследований (см. рис. 1, 2).

В Восточной Сибири существует несколько направлений более ярко выраженного расселения птиц. Явно очень мощным являлся западный поток, за счет которого резко увеличилось разнообразие птиц Предбайкалья (рис. 2). Однако картина расселения птиц с этого направления является достаточно сложной. Несомненно, этот поток их расселения, еще не достигая границ Восточной Сибири, разделяется на два направления. Одно из них идет на восток и в Предбайкалье птицы наиболее интенсивно продвигаются по Иркутско-Черемховской

равнине. Другое в районе горного Алтая резко отклоняется к югу и через Западную Монголию попадает на юго-западную окраину Байкальской рифтовой зоны. Состав птиц здесь очень своеобразен и включает виды совершенно не типичные для Восточной Сибири и, прежде всего, для Предбайкалья. Для них не отмечено фронтальное расселение к востоку. Однако в долине р. Иркут, вплоть до южной оконечности оз. Байкал, отмечаются типично западные виды птиц. Они могли попасть сюда только из Западной Монголии. Проникновение их в этот регион связано с крупными межгорными котловинами Алтайского горного района Монголии. Птицы попадают сюда через широкую степную долину верховий р. Кобдо. Кроме того, они могут легко проникать в Западную Монголию и через горные котловины Гобийского Алтая. Уже из этих котловин они попадают в Котловину Больших озер и далее проникают в котловины озер Цаган-нур и Хубсугул. Отсюда, через горные перевалы восточной окраины Восточного Саяна, птицы достигают верховьев р. Иркут. Именно этим объясняются встречи в его долине вплоть до оз. Байкал ряда видов, характерных для Западной Сибири и Алтая: обыкновенная горлица *Streptopelia turtur*, кольчатая горлица *Streptopelia decaocto*, скальная овсянка *Emberiza buchanani*, горная овсянка *Emberiza cia*, горихвостка-чернушка *Phoenicurus ochruros*, большая чечевица *Carpodacus rubicilla*, индийская пеночка *Phylloscopus griseolus*.

Второе направление интенсивного расселения птиц связано с бассейном р. Селенги. Отсюда на территорию Предбайкалья проникают новые виды, преимущественно, околоводных и водоплавающих птиц, характерных для районов Западной и Центральной Монголии. Основная их часть регистрируется в дельте р. Селенги, откуда они попадают и на западный берег оз. Байкал. Это наиболее простой путь преодоления Байкальской зоogeографической границы, чем, вероятно, и объясняется высокая интенсивность этого направления. Кроме того, здесь расположены наиболее продуктивные озерно-болотные экосистемы Забайкалья, что способствует длительным остановкам птиц на отдыхе. В таких ситуациях они наиболее часто регистрируются всеми исследователями. Именно отсюда в Предбайкалье попадают редкие краснокнижные виды птиц, мало характерные для региона: кудрявый пеликан *Pelecanus crispus*, белокрылая цапля *Ardeola bacchus*, большая белая цапля *Casmerodius albus*, колпица *Platalea leucorodia*, горный гусь *Anser indicus*, сухонос *Anser cygnoides*, немой перепел *Coturnix japonica*, буланый жулан *Lanius isabellinus*, голубая сорока *Cyanopica cyanus* и др.

Третье направление массовых выселений птиц к западу связано с юго-восточной окраиной России, откуда расселяются птицы Восточной Монголии и Восточного Китая. Это направление имеет два ответвления. Основной поток птиц идет межгорными котловинами на запад в сторону дельты р. Селенги, что особенно четко видно в весенний период. Степные и лесостепные участки Даурии и Бурятии рано освобождаются от снега и быстро вскрываются небольшие озерные системы. Из дельты р. Селенги рано открывается мощный пролетный путь по долине р. Ангары, вдоль которого имеются большие по площади лесостепные районы. Эти участки пригодны для массовых миграций птиц уже в конце марта –

начале апреля, когда все горные системы еще покрыты мощным снеговым покровом. Другое ответвление данного потока огибает с северо-востока Байкальскую рифтовую зону, что позволяет ряду видов беспрепятственно проникать на территорию Предбайкалья: большеклювая ворона *Corvus macrorhynchos*, китайская иволга *Oriolus chinensis*, серый личинкоед *Pericrocotus divaricatus* и др. Необходимо отметить, что и с запада птицы могут огибать, через горные системы Восточного Саяна, Байкальскую рифтовую зону, но это направление отличается низкой интенсивностью.

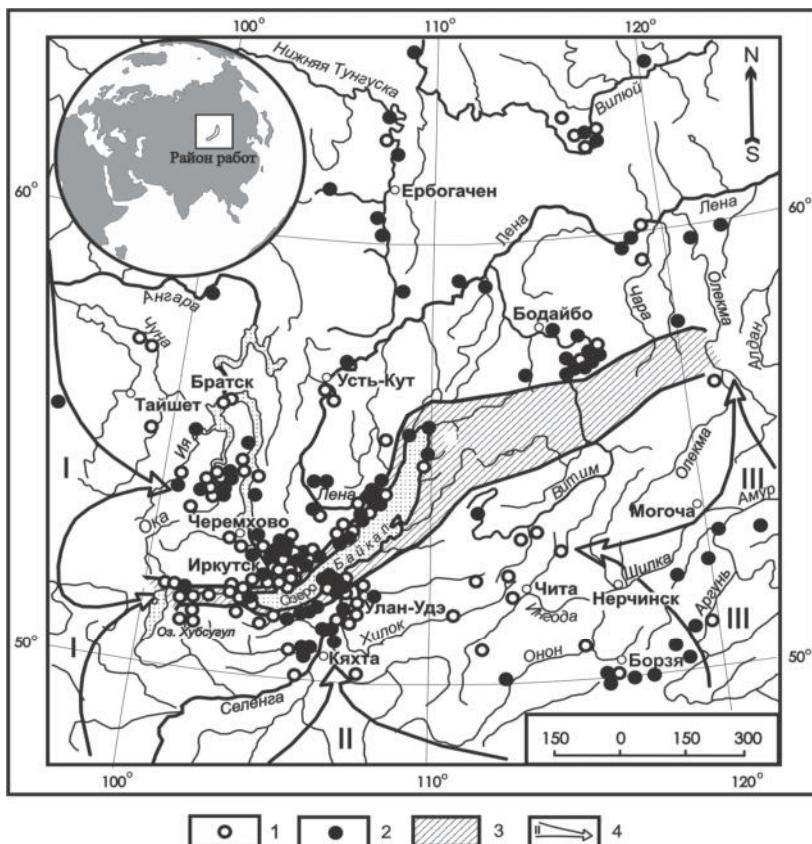


Рис. 2. Расселение новых видов птиц и изменение их ареалов в Восточной Сибири в результате резкого потепления климата:

I – расселение птиц и освоение новых территорий с западного направления, 2 – расселение птиц и освоение новых территорий с восточного направления, 3 – Байкальская зоогеографическая граница, 4 – основные направления расселения (I – с западного направления, II – селенгинский поток расселяющихся птиц с территории Монголии, III – основные потоки расселения с восточного направления (с территории Восточной Монголии и Восточного Китая)

Оценивая общую ситуацию, связанную с расселением птиц, необходимо отметить резкое его усиление во второй половине XX столетия. К его середине в Предбайкалье с западного направления попало 29 новых видов птиц, а с востока в Забайкалье проникли только 13 новых видов. В то же время 22 вида птиц Забайкалья (сюда не входят 13 новых видов) продвинули границы своих ареалов на север и достигли котловины оз. Байкал, а 16 из них преодолели Байкальскую зоогеографическую границу. В то же время из новых видов птиц Предбайкалья только 3 преодолели данную границу и ушли на юго-восток. Несмотря на сравнительно слабое потепление климата в первой половине прошедшего столетия, оно уже вызвало существенные изменения границ ареалов у птиц, расселяющихся с запада. Всего в этот период в Восточной Сибири было зарегистрировано 57 новых видов птиц, встречавшихся, преимущественно, только залетом.

В настоящее время в Восточной Сибири зарегистрировано 237 видов птиц, изменивших свои ареалы, но не все из них являются новыми для данной территории. За весь период исследований в Предбайкалье было зарегистрировано 155 видов птиц, ранее не встречавшихся на его территории, а в Забайкалье только 128 таких видов. Однако надо иметь в виду, что значительная часть новых видов птиц Забайкалья преодолела Байкальскую зоогеографическую границу и ушли на северо-запад. Они были учтены как новые виды птиц Предбайкалья. В связи с этим очень показательны материалы, показывающие какое количество новых видов птиц преодолело Байкальскую рифтовую зону, являющуюся зоогеографической границей между этими регионами. Расселяясь с запада на восток, 37 новых видов птиц преодолели Байкальскую зоогеографическую границу и ушли в Забайкалье. В тоже время с востока на запад эту границу пересекли 77 новых видов птиц и были зарегистрированы в Предбайкалье, Якутии и даже в тундровой зоне.

Из 57 новых видов птиц Восточной Сибири, зарегистрированных в первой половине XX столетия, случайно залетными остались 9 видов. Участились залеты и встречи на всех участках данного региона у 11 видов. Заметный рост обилия отмечен у 12 массовых видов птиц, а для остальных 25 видов было характерно либо единичное гнездование, либо заметное повышение численности с массовым размножением только на отдельных, часто очень небольших, участках их новых ареалов.

Полная фауна птиц Восточной Сибири за конец XIX – первую половину XX столетия, с учетом нового систематического статуса ряда видов (часть подвидов переведена в виды) включает 376 видов птиц [1]. Современная их фауна (вторая половина XX и начало XXI столетий) формируется 490 видами птиц, т. е. она увеличилась на 114 видов (23,3 %) за последние 70 лет. Процесс формирования фауны птиц Восточной Сибири продолжается и каждый год исследований приносит новые виды.

Обсуждение

Начало массового расселения, в первую очередь прибрежных птиц, прослеживалось в Западной Европе еще во второй половине XIX столетия [5]. В

начале XX столетии достаточно сильные засухи, начавшись в Африке, постепенно сдвигались на восток, последовательно охватывая Переднюю, Среднюю и Центральную Азию [4]. Северные окраины южных географических регионов, заходили и на территорию России и именно этим были спровоцированы смещения границ ареалов у многих видов на север. Как показывают наши исследования, в это время сформировался западный поток мигрантов, достигший Предбайкалье, а некоторые виды, преодолев Байкальскую зоогеографическую границу попали в Забайкалье. Первые сильные и обширные засухи в Западной Монголии отмечены в 1948 г., а в последующие годы они последовательно охватывали крупные регионы Монголии. В начале 50-х гг. прошедшего столетия начинает увеличиваться частота повторяемости обширных засух, в 1968 г. сильная засуха охватила 70,0 % этой страны, а в 1972 г. всю ее территорию [4]. На период сильных засух приходится волна первых выселений птиц к северу и формируются потоки расселяющихся птиц (50–60-е гг. XX столетия) [5–6, 15].

Критическая ситуация сложилась в середине 1970-х гг., когда в 1975–1977 гг. сильная засуха охватила Китай и прилегающие территории Монголии и России. По оценкам специалистов, такие засухи наблюдаются один раз в 100–600 лет [4]. С окончанием периода катастрофических засух здесь установились долговременные маловодные периоды, спровоцировавшие дальнейшее выселение птиц, прежде всего прибрежных, в прилежащие регионы. Всего отмечено 4 массовых волны выселяющихся птиц и каждой волне были характерны вполне определенные виды, в зависимости от расположения регионов, охваченных сильными засухами. В первую очередь выселялись околоводные и водоплавающие птицы, поскольку наблюдалось сильное сокращение площади и даже полное исчезновение ряда обширных, но мелководных озерно-болотных экосистем. На последнем этапе (современный период) в Восточной Сибири начали появляться степные виды, но подавляющая их часть относится к залетным птицам с небольшим количеством регистраций. Однако на юге региона (пойма р. Аргунь и Торейская котловина) стали регистрироваться южные виды околоводных птиц, ранее никогда не отмечавшиеся в Забайкалье и на прилежащих территориях. Следовательно, процесс выселения птиц продолжается и засухами охвачены соседние с Россией южные страны.

Многолетние наблюдения показывают, что Байкальская зоогеографическая граница реально ограничивает расселение птиц – ранее таких данных было очень мало. Это подчеркивается и концентрацией расселяющихся птиц на Южном Байкале. Здесь разрывы горных цепей в дельте р. Селенги и в истоке р. Ангары открывают легкий путь для расселения птиц. На севере Байкальской рифтовой зоны мощные горные хребты сильно ограничивают расселение птиц. Оно идет за счет пролета птиц по ее окраине по долинам крупных рек, рассекающих эти горные цепи. Однако многолетние наблюдения показывают, что в экстремальных ситуациях сильных, даже катастрофических засух и, вероятно, похолоданий, обусловленных очень длительными тенденциями в изменениях климата, птицы могут преодолевать любые географические преграды.

В настоящее время закрываются разрывы в ареалах птиц, возникшие, вероятно, в позднем плейстоцене и связанные с горно-долинным оледенением Восточной Сибири. Они исчезли у многих видов близкородственных птиц, эволюция которых проходила на западных и восточных участках некогда единого ареала предковой формы, разорванного в период сильного похолодания климата.

Заключение

Современный период потепления климата и изменения ареалов всех видов птиц Восточной Сибири отличается резким повышением видового разнообразия, сочетающегося с низкой плотностью их населения. Подавляющая часть новых видов отличается низкой численностью и относится к залетным птицам. Подобная ситуация требует повышенного внимания к сложившейся структуре населения птиц и ее динамике, поскольку она наблюдается крайне редко. В настоящее время наблюдаются начальные стадии формирования нового состава фауны птиц Восточной Сибири, обусловленного общим и очень сильным потеплением климата Земли. Последствия этого предсказать очень сложно, поскольку они будут определяться общим направлением дальнейших его изменений, которые неизвестны.

Список литературы

1. Гагина Т. Н. Птицы Восточной Сибири (список и распространение) // Тр. гос. природн. запка “Баргузинский”. 1961. Вып. 3. С. 99–123.
2. Закономерности климатических изменений в XX в. и основные физические процессы, ответственные за эти изменения / Г. А. Жеребцов, В. А. Коваленко, С. И. Молодых, О. А. Рубцова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2011. Т. 4, № 1. С. 87–108.
3. Коблик Е. А., Редькин Я. А., Архипов В. Ю. Список птиц Российской Федерации. М. : Тов-во научн. изд. КМК, 2006. 256 с.
4. Кошеленко И. В. Засухи и борьба с ними. Обзор. Обнинск : Изд-во ВНИИГМИ-МСД, 1983. Вып. 4. 56 с.
5. Мельников Ю. И. Циклические изменения климата и динамика ареалов птиц на юге Восточной Сибири // Орнитогеография Палеарктики: современные проблемы и перспективы. Махачкала : Изд-во ДГПУ, 2009. С. 47–69.
6. Мельников Ю. И., Гагина-Скалон Т. Н. Птицы озера Байкал (с конца XIX по начало XXI столетия): видовой состав, распределение и характер пребывания // Бюллютень МОИП. Отд. биол. 2016. Т. 121, вып. 2. С. 13–32.
7. Мухина Л. И., Преображенский В. С., Томилов Г. М., Фадеева Н. В. Природное районирование // Предбайкалье и Забайкалье. М. : Наука, 1965. С. 323–377.
8. Напрасников А. Т. Гидролого-климатические системы: геоэкологический анализ. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2003. – 144 с.
9. Обязов В. А. Региональный ответ на глобальные изменения приземной температуры (на примере Забайкалья) // Доклады Академии наук, 2015. Т. 461. № 4. С. 459–462.
10. Обязов В. А. Изменение климата и гидрологического режима рек и озер в Даурском экорегионе // Проблемы адаптации к изменению климата в бассейнах рек Даурии: экологические и водохозяйственные аспекты. Чита : Экспресс издательство, 2012. С. 24–45.
11. Равкин Е. С., Челинцев Н. Г. Методические рекомендации по комплексному маршрутному учету птиц. Репринт. М. : Изд-во Госкомприроды СССР, 1990. 33 с.
12. Рябцев В. К. Птицы Сибири. Справочник-определитель : в 2 т. М. ; Екатеринбург : Кабинетный учений, 2014. Т. 2. 452 с.
13. Сыроечковский Е. Е. Изменение ареалов птиц в Средней Сибири в результате потепления климата и воздействия человека // Орнитология. М. : Изд-во МГУ, 1960. Вып. 3. С. 212–218.
14. Шимараев М. Н., Старыгина Л. Н. Зональная циркуляция атмосферы, климат и гидрологические процессы на Байкале (1968–2007) // География и природные ресурсы. 2010. № 3. С. 62–68.
15. Mel'nikov Yu. I. Large-scale modern climate change and reactions of steppe birds of Inner Asia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 817. 012066
16. Taczanowski L. Faune ornithologique de la Sibérie orientale. St.-Petersburg: Mem. de l' Acad. Sci., 1893. Vol. 39, N 7. 1278 pp.

УДК 551.510.42

Об испарении с поверхности снега в арктической зоне России в условиях изменения климата

А. Н. Постников

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. В работе предпринята попытка оценить испарение с поверхности снежного покрова на территории материковой части российской Арктики в условиях изменяющегося климата, конкретно, за тридцатилетний период 1986–2015 гг. За южную границу российской Арктики принята широта Северного полярного круга. Проведено сравнение полученного испарения с испарением за период, относящий к эпохе стационарного климата. Установлено, что испарение со снега заметно снижает запасы воды в снеге на начало весеннего таяния, а, значит, может активно влиять на уменьшение стока половодья. Указано на незначительное повышение испарения за последний период в западной части российской Арктики и снижение, также незначительное, в восточной ее части. Испарение оценивалось по формуле автора, связывающей испарение с дефицитом влажности воздуха.

Ключевые слова: российская Арктика, изменение климата, испарение со снежного покрова.

Испарение является одной из главных компонент теплового и водного балансов определенной территории и представляет связующее звено между метеорологическими и гидрологическими процессами, на ней происходящими. Испарение с поверхности снежного покрова и его оценка представляет определенный научный и практический интерес. В настоящей работе предпринята попытка приближенной оценки испарения с поверхности снега на материковой части арктической зоны России в современных условиях, т. е. в условиях изменяющегося климата, и сравнение ее с величинами испарения, характерными для условий стационарного климата. За южную границу Арктической зоны принималась широта Северного полярного круга ($\phi=66^{\circ}33'$).

Краткая предыстория

На основании результатов наблюдений П. П. Кузьмин получил эмпирические формулы для расчета испарения с поверхности снега:

$$E = (0,18 + 0,10U_{10})(e_0 - e_2) \text{ [мм/сут.],} \quad (1)$$

$$E = (0,24 + 0,05U_{10}) \text{ [мм/сут.],} \quad (2)$$

$$E = 0,37nd_2 \text{ [мм],} \quad (3)$$

где E – испарение; U_{10} – скорость ветра (м/с) на высоте 10 м; e_0 – давление насыщенного водяного пара при температуре поверхности снега (гПа); e_2 – парциальное давление водяного пара в воздухе на высоте 2 м (гПа); d_2 – дефицит влажности воздуха (гПа) на высоте 2 м; n – число суток в расчетном периоде [1; 3; 6]. После анализа более 2500 серий суточных данных наблюдений за испарение со снега и сопутствующими метеоэлементами [2] автором настоящей работы также была получена формула, несколько уточняющая формулу (3), для расчета испарения со снега:

$$E = 0,3Ind \text{ [мм]}, \quad (4)$$

с помощью которой была построена карта среднего многолетнего испарения с поверхности снежного покрова на территории России [4] за период до заметных изменений климата, которыми отмечены последние десятилетия. При этом испарение рассчитывалось по данным о дефиците влажности воздуха и датах установления и схода снежного покрова из Справочника по климату СССР [7], в котором обобщены данные метеонаблюдений, примерно, на уровень 1960 г. Построение подобной карты для периода более позднего времени, к сожалению, затруднено в связи с отсутствием необходимых исходных данных: в настоящее время не публикуются ни на бумажных, ни на электронных носителях данные о дефиците влажности воздуха и датах установления и схода снежного покрова. В [8] можно найти только данные о среднемесячных значениях абсолютной и относительной влажности воздуха по очень ограниченному числу станций. В работе автора [5] определение среднего многолетнего испарения со снега в арктической зоне России также проводилось по формуле (4). Испарение определялось не только за весь период залегания снежного покрова, но и отдельно за осенний (дата установления снежного покрова – 30 ноября), зимний (декабрь – февраль) и весенний (1 марта – дата схода снежного покрова) периоды. Для перечисленных периодов, исключая осенний, результаты расчетов испарения представлены в виде карт. Для осеннего периода построение карты было затруднено из-за достаточно хаотичного изменения испарения по территории. Результаты работы [5] получены на основании данных Справочника по климату СССР и, поэтому, относятся к эпохе стационарного климата так же, как и результаты работы [4].

Испарение с поверхности снега на первый взгляд невелико, оно составляет около 10 % от годового испарения. Однако, если его сравнивать с запасами воды в снежном покрове на конец зимы, то можно прийти к выводу, что испарение со снега играет заметную роль в природе. В табл. 1 приведены средние многолетние значения этого испарения (E) и запасов воды в снеге на лесных маршрутах (S) на начало снеготаяния для ряда станций в арктической зоне [5].

Таблица 1

Испарение и запасы воды в снеге на начало весеннего снеготаяния

Станция	$S, \text{мм}$	$E, \text{мм}$	$(E+S), \text{мм}$	$E/S, \%$
Джорджан	96	23	119	24
Жиганск	81	24	105	30
Шелогонцы	57	12	69	21
Сектях	48	21	69	44
Сухана	56	27	83	48
Средне-Колымск	80	18	98	23
Сого-Хоя	77	15	92	19
Томпо	32	13	47	40
Агата	122	17	139	14
Курейка	196	23	219	12
Янов Стан	183	19	202	10
Туруханск	140	22	171	16
Верещагино	172	22	194	13

Окончание табл. 1

Станция	<i>S, мм</i>	<i>E, мм</i>	<i>(E+S), мм</i>	<i>E/S, %</i>
Оленек	53	18	71	34
Янск	27	13	40	48
Усть-Мома	32	10	42	31
Среднее	91	19	110	27

По данным приведенной таблицы испарение с поверхности снега сокращает запасы воды в снеге, в среднем, на 27 %. Но это одновременно означает, что оно сокращает и сток весеннего половодья. При отсутствии испарения со снега реки России были бы заметно полноводнее.

Полученные результаты, их обобщение

Целью настоящей работы является сравнение испарения со снежного покрова в арктической зоне России за два периода: первый – до 1960 г. и второй с 1986 по 2015 г. Первый из этих периодов мы относили к эпохе стационарного климата, а второй – к эпохе заметно изменяющегося климата. Для характеристики первого периода использовались данные [7], а для характеристики второго – данные [8]. Испарение за оба периода рассчитывалось по формуле (4). Для выполнения расчета среднемноголетнего испарения за период залегания снежного покрова кроме дефицита влажности воздуха необходимо знать еще средние многолетние даты установления и схода снежного покрова в каждом пункте, для которого проводится расчет. За первый период все перечисленное можно найти в [7]. При расчете испарения за второй период возникли затруднения, связанные с отсутствием данных как по дефициту влажности воздуха, так и по датам установления и схода снежного покрова. Для выхода из создавшегося положения мы попытались использовать приближенные значения месячного дефицита влажности воздуха, определяемые по формуле:

$$d' = e_0(1 - 0,01r) \text{ гПа}, \quad (5)$$

где e_0 – месячное значение давления (гПа) насыщенного водяного пара в воздухе, определяемого по средней за месяц температуре воздуха; r – месячное значение относительной влажности воздуха (%). Все величины, входящие в формулу (4), есть средние многолетние величины за соответствующие месяцы периода залегания снежного покрова. Необходимо было установить, насколько величины d' соответствуют величинам d , т. е. значениям дефицита влажности воздуха, определенным правильными традиционными методами. Для этого по ряду метеостанций, расположенных в северных районах России, из Справочника по климату СССР [7] за холодный период года были выписаны месячные значения температуры, относительной влажности и дефицита влажности воздуха d . Затем по формуле (5) были определены величины d' и построен график связи между d' и d (рис. 1).

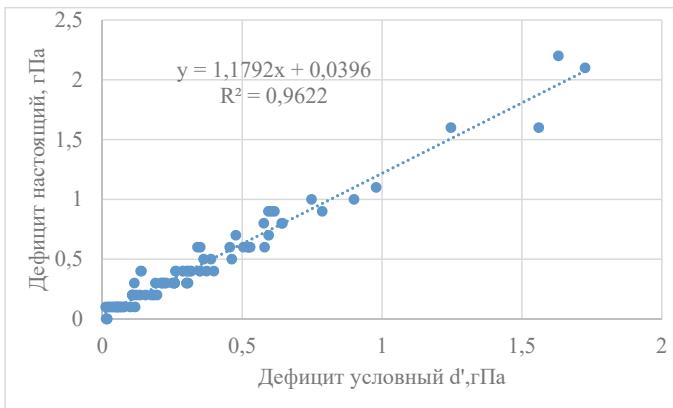


Рис. 1. Связь между условным и настоящим дефицитами влажности воздуха

Данные рис. 1 показывают, что связь между d' и d с коэффициентом корреляции, равным 0,98, можно выразить уравнением:

$$d = 1,18d' + 0,04. \quad (6)$$

Отсюда, месячный дефицит влажности воздуха, используемый при расчетах испарения за второй период, определялся следующим образом. Сначала по значениям температуры и относительной влажности воздуха определялись по формуле (5) значения d' , которые по формуле (6) пересчитывались в величины d , применяемые при использовании формулы (4) для расчетов испарения с поверхности снежного покрова. Для определения дат установления и схода снежного покрова использовались их связи с датами устойчивого перехода температуры воздуха в сторону понижения (осень) и в сторону повышения (весна). На рис. 2 представлена связь между днями устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C в сторону понижения (Дт) и днями установления устойчивого снежного покрова (Ду). Дни отсчитаны от 1 сентября. Данные рис. 2 показывают, что эта связь выражается уравнением:

$$\text{Ду} = 1,31 \text{ Дт} + 4. \quad (7)$$

Теснота связи оценивается коэффициентом корреляции 0,92. Стандартная погрешность определения Ду по этому уравнению составляет 4 дня.

На рис. 3 представлена связь между днями схода снежного покрова (Дсх) и днями устойчивого перехода температуры через 0°C в сторону повышения (Дт). Дни отсчитаны от 1 марта.

Данные рис. 3 показывают, что связь между Дсх и Дт выражается уравнением:

$$\text{Дсх} = 0,96\text{Дт} + 5 \quad (8)$$

при высоком коэффициенте корреляции, равном 0,98. Стандартная погрешность определения Дсх также составляет 4 дня.

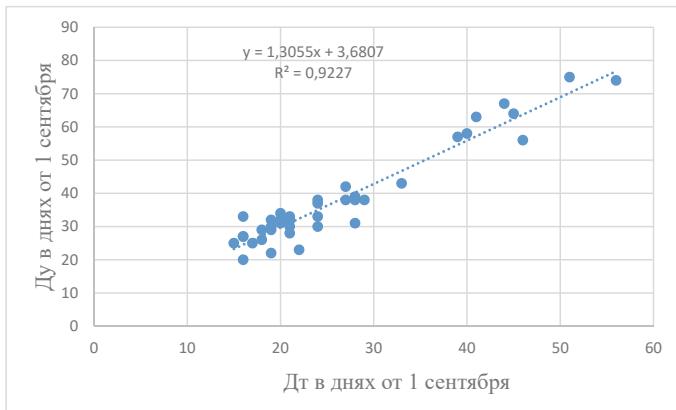


Рис. 2. Связь между Dt и Du

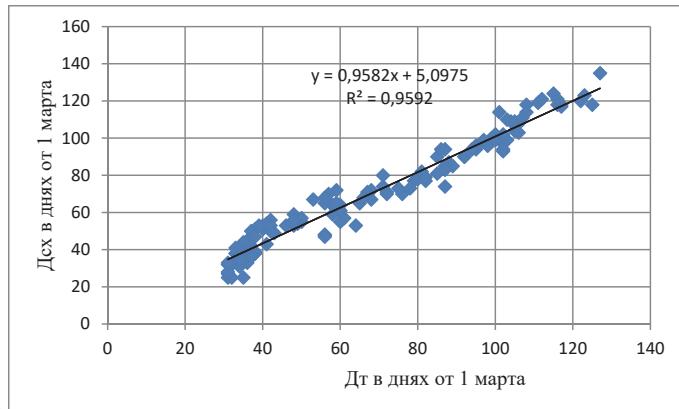


Рис. 3. Связь между Dt и Dsx

Графики на рис. 2 и 3 построены поданным [7], т. е. для периода стационарного климата. В работе считалось, что связи, определяемые уравнениями (7) и (8), сохраняются, и в период 1986–2015 гг. пригодны для определения дат установления и схода снежного покрова. Итак, по описанной методике определялись средние многолетние месячные значения дефицита влажности воздуха и средние многолетние даты установления и схода снежного покрова за второй период. Исследования, предпринятые в настоящей работе, проводились по данным 17 станций (табл. 2 и 3), более или менее равномерно распределенным по долготе в арктической зоне. В табл. 2 приводятся средние многолетние даты установления и схода снежного покрова.

Таблица 2

Средние многолетние даты установления и схода снежного покрова

Станция	Даты установления снежного покрова		Разность дат, сут.	Даты схода снежного покрова		Разность дат, сут.
	Первый период	Второй период		Первый период	Второй период	
Мурманск	05.11	10.11	5	06.05	20.04	-16
Индига	03.11	06.11	3	30.05	13.05	-17
Канин Нос	13.11	20.11	7	30.05	16.05	-14
Нарьян Мар	27.10	27.10	0	24.05	11.05	-13
Салехард	15.10	17.10	2	28.05	16.05	-12
Тазовское	07.10	10.10	3	02.06	26.05	-7
Дудинка	07.10	07.10	0	05.06	28.05	-8
Хатанга	29.09	30.09	1	09.06	30.05	-10
Ессей	04.10	02.10	-2	30.05	25.05	-5
Саскылах	26.09	09.10	13	03.06	31.05	-3
Жиганск	03.10	05.10	2	18.05	11.05	-7
Кюсюр	28.09	02.10	4	02.06	22.05	-11
Чокурдах	25.09	29.09	4	06.06	29.05	-8
Средне-Колымск	03.10	06.10	3	21.05	14.05	-7
Островное	28.09	04.10	6	22.05	12.05	-10
Илирней	29.10	29.10	0	02.06	20.05	-13
Амгуэма	04.10	25.09	9	12.06	23.05	-20
Среднее			4			-11

Данные табл. 2 показывают, что на большинстве станций установление снежного покрова стало происходить позже. В среднем по территории это запаздывание составляет 4 дня. Сход снежного покрова стал повсеместно происходить раньше. Средняя величина этого опережения составляет 11 сут. Таким образом, период залегания снежного покрова во втором периоде по сравнению с первым сократился на 15 сут., т. е. на половину месяца. Расчеты испарения проводились по формуле (4) за каждый месяц, месячные результаты затем суммировались. За месяцы, в которые снежный покров устанавливался или сходил, испарение также сначала определялось за месяц по формуле (4), а затем умножалось на дробь, в числителе которой было число дней этого месяца, в течение которых снег присутствовал, а в знаменателе – число дней в данном месяце. Сравнение полученных результатов определения испарения с поверхности снежного покрова приведено в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение испарения со снежного покрова от даты установления до даты его схода за два периода

Станция	Испарение за первый период, мм	Испарение за второй период, мм	Изменение испарения	
			мм	%
Мурманск	46	49	3	7
Индига	27	34	7	26
Канин Нос	39	35	-4	-10
Нарьян-Мар	35	38	3	9
Салехард	27	34	7	26
Тазовское	21	28	7	33

Окончание табл. 3

Станция	Испарение за первый период, мм	Испарение за второй период, мм	Изменение испарения	
			мм	%
Дудинка	27	30	3	11
Хатанга	22	25	3	14
Ессей	33	30	-3	-9
Саскылах	25	23	-2	-8
Жиганск	33	34	1	3
Кюсюр	34	30	-4	-12
Чокурдах	24	22	-2	-8
Средне-Колымск	29	27	-2	-7
Островное	38	33	-5	-13
Илирней	29	26	-3	-10
Амгуэма	28	27	-1	-4
Среднее	30	31	1	3

Согласно формуле (4), рассчитанное испарение зависит как от суммы дефицита влажности воздуха, так и от продолжительности расчетного периода. В данном случае оба этих фактора вносят противоречивые вклады в определение испарения: период залегания снежного покрова сокращается, но температура воздуха растет, в результате чего происходит и увеличение дефицита влажности воздуха. Данные табл. 3 показывают, что станции с увеличившимся испарением преобладают в западной части арктической зоны (ст. Мурманск–ст. Ессей). В абсолютных единицах эти увеличения кажутся небольшими, однако относительно испарения в первый период они по отдельным станциям составляют от 7 до 33 % (табл. 3). Если учесть данные двух станций с отрицательным ростом испарения (ст. Канин Нос и ст. Ессей), то получим, что в среднем, в западной части рассматриваемой зоны испарение со снега во втором периоде по отношению к первому увеличилось на 9 %. В восточной части зоны (ст. Саскылах–ст. Амгуэма) преобладают станции с уменьшившимся испарением. Среднее уменьшение испарения со снега за второй период по сравнению с первым в восточной части арктической зоны по данным табл. 3 можно оценить в 7 %. Следует отметить, что обе относительные оценки получены путем деления алгебраических сумм изменения испарения в мм на суммы испарения за первый период по станциям западной и восточной частей арктической зоны. В среднем по всей арктической зоне России испарение со снежного покрова в абсолютных единицах во втором периоде увеличилось на 1 мм, а в относительных единицах – на 3 % (табл. 3). Поэтому, казалось бы, можно сделать вывод, что испарение от первого ко второму периоду в российской Арктике практически не изменилось. Но такой вывод представляется чрезмерно усредненным. Правомернее делать выводы отдельно для каждой части территории, как это сделано в настоящей работе.

Список литературы

1. Кузьмин П. П. О расчетных и экспериментальных способах определения испарения с поверхности снежного покрова // Труды ЗакНИГМИ. 1974. Вып. 58 (64). С. 19.

2. Материалы наблюдений над испарением с поверхности снежного покрова за период 1963–1975 гг. Фотоофтсетная лаборатория ВНИГЛ ГГИ, 1997. 146 с.
3. Методы изучения и расчета водного баланса. Л. : Гидрометеоиздат, 1981. 397 с.
4. Постников А. Н. Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 42. С. 9.
5. Постников А. Н. Испарение с поверхности снежного покрова в арктической зоне России // Евразийское научное объединение. 2019. Т. 6, № 3 (49). С. 5.
6. Рекомендации по расчету испарения с поверхности суши. Л. : Гидрометеоиздат, 1974. 96 с.
7. Справочник по климату СССР Температура воздуха, влажность воздуха, атмосферные осадки. Л. : Гидрометеоиздат, 1966.
8. Сайт ВНИИГМИ-МЦД. URL: meteo.ru (дата обращения: 24.02.2022).

УДК 556.555.3(282.256.33+282.256.34)

Особенности современных колебаний стока Енисея и Ангары

В. Н. Синюкович (sin@lin.irk.ru)

Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

Аннотация. Рассмотрены особенности внутригодовой и многолетней изменчивости стока Енисея и Ангары (до их слияния) в естественных и зарегулированных условиях, в периоды с разными климатическими условиями. Оценены изменения внутригодового распределения водности рек в результате их зарегулирования. Определены характеристики межгодовых изменений стока Енисея и Ангары, указывающие на меняющуюся степень согласованности колебаний их водности, очевидно, связанную с разными атмосферными процессами, формирующими сток в бассейнах исследуемых рек, а также с общими изменениями климата в регионе. Отмечены изменения региональных синоптических условий, определяющих выпадение атмосферных осадков, среди которых наиболее значимы развитие процессов блокирования, изменение роли высотного циклогенеза и монгольских циклонов. Подчеркнута практическая значимость изучения рассматриваемой проблемы для Объединенной энергосистемы Сибири, куда входят ГЭС Ангаро-Енисейского каскада, а также для судоходства на Енисее.

Ключевые слова: сток, внутригодовое распределение, маловодный и многоводный периоды, изменения климата.

Введение

Наполнение и режим эксплуатации водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада ГЭС главным образом зависят от водности главных рек, на которых они созданы. При этом несовпадающие по знаку изменения стока на Енисее и Ангаре позволяют компенсировать дефицит водных ресурсов на одной реке их избытком на другой. Для р. Ангары, где эксплуатируются 4 водохранилища (Иркутское, Братское, Усть-Илимское и Богучанское) определяющим фактором является водность в бассейне оз. Байкал (доля «байкальских» вод в стоке даже через Богучанскую ГЭС составляет 56 %). Данное обстоятельство может иметь решающее значение, так как по данным [3] по Байкалу проходит граница зоны выпадения осадков атлантического происхождения. Восточнее ее в формировании

речного стока более значимы осадки с Тихого и Индийского океанов, хотя в зимнее время атлантическая влага достигает тихоокеанского побережья. Согласованность стока Енисея и Ангары до их слияния, вследствие указанных различий, характеризуется коэффициентами корреляции, близкими к нулевым [7]. В то же время выдающиеся наводнения и маловодья на Енисее и на Ангаре могут наступать достаточно синхронно, что особенно отчетливо проявилось в маловодный период 2014–2017 гг. Однако в отдельные периоды колебания стока рассматриваемых рек не совпадают, нередко принимая противоположный характер. Наглядным примером этому служит 2022 г. со значительным дефицитом притока в енисейские водохранилища, тогда как в ангарские, наоборот, приток был повышенным. Подобные ситуации, очевидно, отражают реакцию стокоформирующих процессов в регионе на изменения климата и требуют всестороннего изучения.

В настоящем исследовании использованы материалы наблюдений Росгидромета и данные Информационно-аналитического Центра Регистра и Кадастра за 1936–2021 гг. по стоку Енисея у пос. Базаиха (нижний бьеф Красноярской ГЭС) и стоку Ангары у г. Братска Несмотря на разные размеры водосборных территорий (300 тыс. км² Енисей у Базаихи и 736 тыс. км² Ангара у Братска) средний сток этих рек в указанных створах практически одинаков и составляет около 90 км³/год. В соответствии с меньшей площадью бассейна модуль стока Енисея в 2,5 раза превышает модуль стока Ангары. Генезис стока рек также не совпадает: преобладающим источником питания Енисея являются талые воды, а в питании Ангары доминируют дождевые.

Результаты и обсуждение

Предварительный анализ многолетних колебаний стока исследуемых рек (рис. 1) указывает на непостоянство их согласованности, хотя обоим водотокам присуща тенденция незначительного снижения водности. Характеризующий связь годового стока Енисея и Ангары за весь рассматриваемый период коэффициент корреляции составляет только 0,19, тогда как в годы до их зарегулирования он был несколько выше (0,44). Ухудшение связи после зарегулирования рек связано, очевидно, со значительными изъятиями стока на начальное заполнение водохранилищ, так как после заполнения они больше оказывают сглаживающее влияние на режим стока.

Кроме того, колебания водности Ангары визуально отличаются более плавным ходом, однако коэффициент вариации стока для обеих рек получился одинаковым и составляет 0,14.

Следует отметить, что выдающиеся по водности годы на Енисее не всегда сопровождаются аналогичными показателями стока на Ангаре. Повышенным расходам воды Енисея в 1936, 1966 и 2006 гг. соответствуют средние, или даже пониженные значения стока Ангары. Однако 2021 г. был многоводным на обеих реках, а в 2022 г. – только на Ангаре. Такая ситуация указывает на различную природу увлажнения бассейнов сравниваемых рек, формирующуюся под воздействием разных атмосферных процессов. В первую очередь, это различное положение территорий относительно границы зон осадков Атлантического и Тихо-

океанского происхождения [3], что предполагает и несинхронность их стокопродуктивности. По результатам исследований [2] видно, что 60–70 % циклонов, увлажняющих бассейны Верхнего Енисея и Ангары, зарождаются в Восточной и Западной Сибири, а с Атлантики приходит не более 10 % от их числа. Периоды же арктических вторжений малопродуктивны для стока рассматриваемых рек, так как они приводят к уменьшению прогрева верхних слоев почвенного покрова, способствуя снижению интенсивности восходящих движений воздуха и интенсивности образования местных циклонов [2].

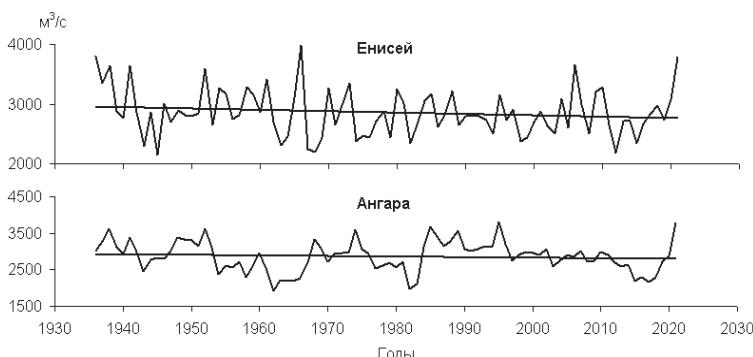


Рис. 1. Динамика многолетних колебаний стока Енисея и Ангара.
Прямая линия – тренд

Можно ожидать, что в условиях нестабильности климата происходит и перестройка атмосферных процессов, нарушающая сложившиеся механизмы формирования стока в столь сложном в природном отношении регионе. При этом реакция водности Енисея и Ангара в рассматриваемых створах на современное усиление потепления в России с начала 1970-х гг. [4] практически незаметна – изменения их стока относительно данного рубежа составляют 2–4 %. Возможно, влияние изменения климатических условий на формирования стока стало проявляться несколько позже, в пользу чего говорит пониженная водность в самом начале потепления: Енисея в 1974–1979 гг. и Ангара – в 1977–1982 гг. Характерные для региона атмосферные процессы [6], вызывающие выпадение осадков, в последние десятилетия претерпевают заметные изменения, выражющиеся в развитии процессов блокирования, влияния высотного циклогенеза и изменении влияния на формирование режима увлажнения территории Монгольских циклонов [1; 5], а также асинхронности выпадения осадков в Восточной Сибири и Монголии [8].

В отношении внутригодовых колебаний стока исследуемых рек в первую очередь заметно их выравнивание после зарегулирования (рис. 2), а для Ангары даже смещение многоводных месяцев с теплого времени года на холодное. Однако в отдельные периоды в зависимости от величины притока к водохранили-

щам и степени их наполнения, внутригодовое распределение стока через Красноярский и Братский гидроузел может существенно отличаться от изображенных на рисунке. В теплый период 2022 г., например, водность Ангары была повышенной и практически все время превышала 3000 м³/с (рис. 3). Сброс же через Красноярскую ГЭС из-за низкого половодья на притоках Енисея и незаполненности водохранилищ с начала года оставался ниже 3000 м³/с, а с начала июля был уменьшен до 2000 м³/с.

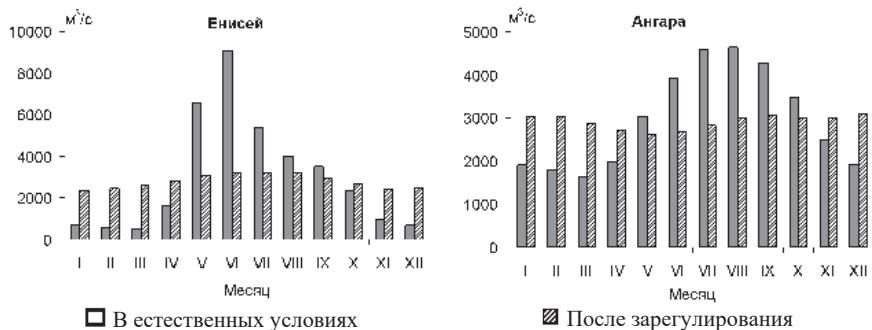


Рис. 2. Внутригодовое распределение стока

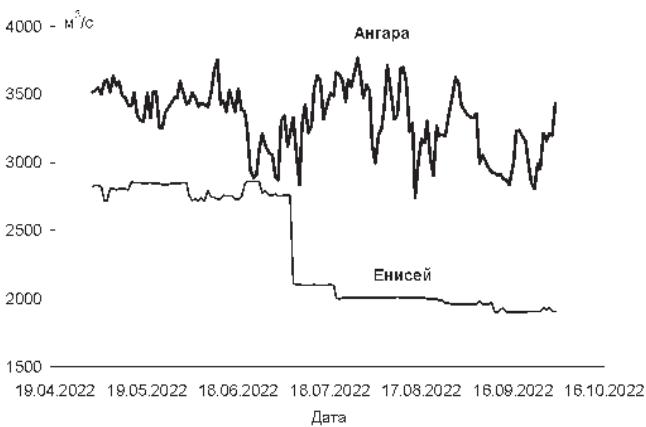


Рис. 3. Гидрограф стока рек в мае-сентябре 2022 г.

Заключение

Многолетние колебания стока Енисея и Ангары (до слияния) из-за разных условий увлажнения их водосборных территорий характеризуются слабой согласованностью и в отдельные периоды могут носить противоположный характер. Регулирующая роль водохранилищ более всего проявляется во внутригодовом

распределении стока рассматриваемых рек, а также в периоды аномально высокой или низкой водности, когда возникает опасность переполнения водохранилищ, или их сработки до критических уровней.

Происходящие изменения климата сопровождаются перестройкой атмосферных процессов в регионе и определяют новые условия его увлажнения и формирования речного стока. К ним относится развитие процессов блокирования, изменение роли высотного циклогенеза и влияния монгольских циклонов. Учет и изучение новых нюансов колебаний стока Енисея и Ангары представляются актуальными задачами современной гидрометеорологии, а также имеют чрезвычайно важное практическое значение для энергетики всех ГЭС их каскада, входящих в Объединенную энергосистему Сибири, для судоходства на Енисее, обеспечивающего завоз грузов на север Красноярского края и др.

Исследование выполнено в рамках госзадания ЛИН СО РАН (тема № 0279-2021-0004).

Список литературы

1. Антохина О. Ю., Антохин П. Н., Девятова Е. В., Мордвинов В. И. Основные режимы выпадения осадков на юге Восточной Сибири и в Монголии в июле // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 6. С. 443–450.
2. Бабкин В. И., Постников А. Н. Циклонические осадки и сток Оби и Енисея в маловодные и многоводные годы // Метеорология и гидрология – 2002. – № 12. – С. 79–85.
3. Воскресенский К. П., Бочков А. П. Водные ресурсы и баланс вод Сибири // Труды ГГИ. 1972. Вып. 200. С. 88–102.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/htm/10.02.2014 (дата обращения 12.07.2021).
5. Латышева И. В. Монгольские циклоны в условиях меняющегося климата // XXVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». 05–09 июля 2021 г. М. ; Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2021. Т. 27. С. D198–D101.
6. Лощенко К. А., Латышева И. В. Региональные особенности синоптических процессов на территории Иркутской области // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2016. Т. 11. С. 38–54.
7. Синникович В. Н. О характере и природе синхронных колебаний стока рек юга Сибири // География и природные ресурсы. 1999. № 3. С. 91–97.
8. Iwao K., Takahashi M. A precipitation seesaw mode between Northeast Asia and Siberia in summer caused by Rossby waves over the Eurasian continent // J. Clim. 2008. Vol. 21, N 11.P. 2401–2419.

УДК 551.582.2

Оценка климатической устойчивости урожаев озимой пшеницы на территории Центрально-Черноземного экономического района

И. А. Смирнов (ivan-2-2-99@yandex.ru)

Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К. А. Тимирязева, Москва

Аннотация. Представлена динамика значений урожайности озимой пшеницы на территории областей Центрально-Черноземного экономического района России за 1961–2020 гг. На основе этих данных с помощью методики В. М. Пасова по трем двадцатилетним периодам оценена климатическая устойчивость урожаев озимой пшеницы в каждой из пяти областей этого района. Результаты оценки представлены в таблице и интерпретированы в виде карт-схемы. На основе полученных результатов сделаны выводы об устойчивости урожаев озимой пшеницы на территории пяти областей Центрально-Черноземного экономического района, а также о благоприятности возделывания озимой пшеницы в рассмотренных областях в перспективе.

Ключевые слова: климат, продуктивность, урожайность озимой пшеницы, устойчивость урожая, ЦЧЭР.

Зерновые культуры в целом и пшеница в частности занимают ведущее место в мировом земледелии и имеют важнейшее значение для населения, являясь сырьем и для основных продуктов питания, и для крахмало-паточной, декстриновой, пивоваренной и спиртовой промышленности, и для производства кормов для скота, и т. д. Увеличение валового сбора зерна, таким образом, обеспечивает продовольственную безопасность страны [5; 9].

Центрально-Черноземный экономический район (далее ЦЧЭР) включает в себя пять областей: Воронежскую, Курскую, Белгородскую, Липецкую и Тамбовскую. Его можно назвать одним из основных и благоприятных районов для возделывания озимой пшеницы в нашей стране: валовой сбор, по данным на 2021 г., составляет 17,9 % валового сбора данной культуры в РФ. Высокие урожаи озимой пшеницы в этом экономическом регионе не только обеспечивают страну продовольствием, но и являются одной из важнейших статей экспорта и, как следствие, дохода Российской Федерации [6–8].

На конечный урожай озимой пшеницы, а также урожайность (продуктивность), показывающую количество центнеров, собранное с одного гектара, оказывает влияние совокупность множества факторов: антропогенных, биотических, абиотических и, что особенно важно, климатических и метеорологических.

Необходимо стараться как можно более заблаговременно и точнее оценивать состояние погоды, атмосферы и т. д., чтобы проанализировать их потенциальное влияние на продуктивность посевов сельскохозяйственной культуры и по возможности предпринять защитные и профилактические меры.

Но в тоже время для рационального и рентабельного земледелия и сельского хозяйства стоит обращать внимание и на климат, а также его влияние на продуктивность той или иной культуры.

В данной статье, рассматривая вопрос климатической обеспеченности продуктивности озимой пшеницы в течение многолетнего периода с 1961 по 2020 г., дополнительно разбитого на три двадцатилетия (1961–1980, 1981–2000, 2001–2020 гг.), по данным о фактической урожайности, полученным в отделе агрометеорологических прогнозов Гидрометцентра России, с помощью методики В. М. Пасова оценивается устойчивость урожаев озимой пшеницы в каждой из пяти областей ЦЧЭР.

Данная методика подразумевает оценку устойчивости урожаев той или иной сельскохозяйственной культуры на основании отклонения ее фактических и трендовых значений в конкретном году от средних многолетних значений. Она разработана в ВНИИСХМ в 1986 г. и содержит понятие климатической составляющей изменчивости урожаев, которая оценивается величиной коэффициента вариации по формуле:

$$C_m = \frac{1}{y} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y\bar{y}_i - \bar{y})^2}{n-1}}, \quad (1)$$

где C_m – климатическая составляющая изменчивости урожаев; \bar{y} – средняя многолетняя урожайность; y_i – урожайность конкретного года; $y\bar{y}_i$ – урожайность по тренду в конкретном году; n – продолжительность временного ряда урожайности [4].

Среднюю квадратическую ошибку климатической составляющей изменчивости урожаев можно вычислить по формуле:

$$\partial C_m = \frac{c_m \sqrt{1 + c_m^2}}{\sqrt{2(n-1)}}, \quad (2)$$

где n – длина ряда.

В районах, где $C_m \leq 0,20$, формируются наиболее устойчивые урожаи; при $C_m = 0,21 – 0,29$ – умеренно устойчивые урожаи; при $C_m = 0,30 – 0,40$ – неустойчивые урожаи; при $C_m > 0,40$ – наиболее неустойчивые урожаи [4].

Кроме того, в рамках этой методики, можно оценить метеорологические составляющие урожайности Δy_i , выраженные в отклонениях от тренда по формуле:

$$\Delta y_i = \frac{y_i - y\bar{y}_i}{y\bar{y}_i} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где y_i – урожайность конкретного года; $y\bar{y}_i$ – динамическая урожайность, т. е. по тренду.

Динамическая урожайность, т. е. урожайность по тренду, $y\bar{y}_i$ характеризует уровень агротехники, достигнутый в каждом году исследуемого периода, а величина Δy_i – часть изменчивости урожайности, связанную с особенностями агрометеорологических условий периодов вегетации. От уровня изменчивости урожаев зависят и их отклонения от трендовых значений [4].

Данная методика применялась многими исследователями для регионов с разными агроклиматическими условиями и для разных сельскохозяйственных

культур, например, яровой пшеницы на территории областей Уральского региона, зерновых культур в Ульяновской области и Республике Татарстан, зерновых культур, картофеля, сахарной свеклы и льна-долгунца на территории областей Беларуси и др. [1–3; 10]

В данной статье на основе методики В. М. Пасова выполнены расчеты климатических составляющих изменчивости урожайности озимой пшеницы в ЦЧЭР, включающем пять областей, за период с 1961 по 2020 г.

Для наглядной иллюстрации динамики урожайности озимой пшеницы по годам и областям ниже приведен график (рис. 1).

Для начала стоит сказать, что по графику (рис. 1) видно, что продуктивность озимой пшеницы по областям ЦЧЭР в целом за рассматриваемый шестидесятилетний период растет. Уравнения линий тренда следующие: $y = 0,4045x - 777,05$ – для Белгородской области, $y = 0,2687x - 510,13$ – для Воронежской, $y = 0,4579x - 887,22$ – для Липецкой, $y = 0,4062x - 783,06$ – для Курской, $y = 0,3274x - 629,12$ – для Тамбовской.

Теперь перейдем непосредственно к рассмотрению результатов оценки климатической составляющей изменчивости урожайности по методу В. М. Пасова.

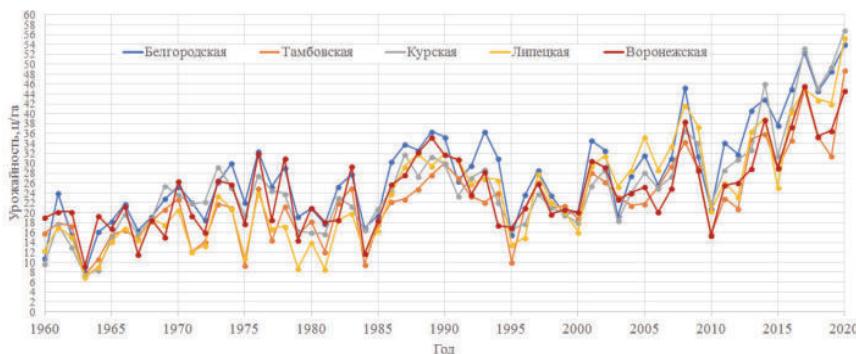


Рис. 1. Урожайность озимой пшеницы в ЦЧЭР (ц/га), 1960–2020 гг.

Основные формулы для расчета климатической составляющей изменчивости урожая C_p , оно же C_m в основной формуле В. М. Пасова, и средней квадратической ошибки δC_m представлены выше. Нами же для нахождения этих показателей, а также получения значений урожайности озимой пшеницы по тренду была использована специализированная программа TRENDnow, дающая возможность рассчитать тенденции урожая по методу гармонических весов. Расчеты были произведены для каждой из пяти областей ЦЧЭР за три рассматриваемые двадцатилетия по фактическим данным об урожайности озимой пшеницы. Ниже, на рис. 2, в качестве примера представлен результат, выданный программой для Курской области за период с 2001 по 2020 г. Затем фактические значения об урожайности озимой пшеницы, слаженные значения по тренду и их разница занесились в таблицу в Excel.

 kursk1.res – Блокнот

Файл Правка Формат Вид Справка

РАСЧЕТ ТЕНДЕНЦИИ УРОЖАЯ ПО МЕТОДУ

ГАРМОНИЧЕСКИХ ВЕСОВ

 $N = 20 \quad K = 10$

N - длина ряда, K - параметр сглаживания

Фактические значения урожая по годам, ц/га

25.5 28.6 18.4 24.1 28.1 25.0 27.3 36.6 34.1 21.7 28.6 30.8

32.7 46.1 31.4 40.9 53.3 45.1 49.5 56.9

+++++
Сглаженные значения урожая - тренд, ц/га

24.2 24.6 24.6 25.6 26.2 26.9 27.8 28.5 29.1 29.6 30.8 32.5

34.4 36.7 38.8 41.6 45.0 48.1 51.5 54.6

+++++
+++++
+++++

Рис. 2. Результат расчета тенденции урожая по методу гармонических весов программой TRENDnow, Курская область, 2001 – 2020 гг.

Ниже в таблице представлены основные интересующие нас значения и показатели, полученные отдельно по трем исследуемым двадцатилетиям для каждой из областей ЦЧЭР. Среди них средняя по области урожайность озимой пшеницы за исследуемый период в ц/га, климатическая составляющая изменчивости урожаев C_m и средняя квадратическая ошибка δC_m , а также уравнения линий тренда, полученные на основе рассчитанных программой значений урожайности по тренду.

Рассматривая таблицу, можно сказать, что согласно градации устойчивости урожаев по В. М. Пасову в первом из исследуемых двадцатилетних периодов Белгородская и Курская области относились к районам с формированием наиболее устойчивых урожаев, C_m соответственно равно 0,17 и 0,16, остальные три субъекта ЦЧЭР – к районам с формированием умеренно устойчивых урожаев, значения C_m составили для Тамбовской области 0,25, для Липецкой – 0,27, для Воронежской – 0,25. Средняя урожайность была наибольшей в Белгородской области – 21,6 ц/га, наименьшей – в Липецкой – 15,6 ц/га, в Тамбовской она составила 16,7 ц/га, в Курской – 19,5 ц/га, в Воронежской – 20,1 ц/га.

Таблица 1

Среднеобластная урожайность озимой пшеницы, климатическая составляющая изменчивости урожаев, ее среднеквадратическая ошибка и уравнения линии тренда (ЛТ) урожайности на территории субъектов ЦЧЭР за рассматриваемые двадцатилетия

Период	1961–1980	1981–2000	2001–2020
Белгородская область			
Ср. урожайность, ц/га	21,6	26,5	36,6
C_m	0,17	0,19	0,15
δC_m	0,028	0,031	0,025
Уравнение ЛТ	$y = 0,6898x + 14,422$	$y = -0,0645x + 27,257$	$y = 1,3024x + 22,705$
Тамбовская область			
Ср. урожайность, ц/га	16,7	21,4	29,7
C_m	0,25	0,21	0,19
δC_m	0,042	0,035	0,031
Уравнение ЛТ	$y = 0,3001x + 13,474$	$y = 0,1117x + 20,247$	$y = 0,8847x + 20,221$
Курская область			
Ср. урожайность, ц/га	19,5	23,0	34,2
C_m	0,16	0,15	0,16
δC_m	0,026	0,025	0,026
Уравнение ЛТ	$y = 0,6838x + 12,415$	$y = -0,1144x + 24,272$	$y = 1,5183x + 18,113$
Липецкая область			
Ср. урожайность, ц/га	15,6	22,4	34,4
C_m	0,27	0,21	0,19
δC_m	0,045	0,035	0,031
Уравнение ЛТ	$y = 0,242x + 13,109$	$y = 0,139x + 21,015$	$y = 0,7644x + 26,244$
Воронежская область			
Ср. урожайность, ц/га	20,1	23,7	30,4
C_m	0,25	0,19	0,17
δC_m	0,042	0,031	0,028
Уравнение ЛТ	$y = 0,4943x + 14,89$	$y = -0,0824x + 24,415$	$y = 0,9013x + 20,762$

Во втором двадцатилетии ситуация с точки зрения устойчивости урожаев во всех областях улучшилась, кроме Белгородской, эта область хоть и осталась в зоне наиболее устойчивых урожаев, но при этом значение C_m повысилось на 0,02 до 0,19. К этой зоне по-прежнему относились и Курская область ($C_m = 0,15$), а также добавилась и Воронежская, где значение C_m снизилось на 0,06 до 0,19. Для Тамбовской и Липецкой областей C_m опустилось до 0,21, что все еще относило их к районам с формированием умеренно устойчивых урожаев. Средняя за этот период урожайность выросла также по всем субъектам ЦЧЭР, их распределение в убывающем порядке по этому показателю осталось тем же, что и в предыдущем двадцатилетии, однако наименьшая средняя урожайность теперь отмечалась по Тамбовской области (21,4 ц/га), а не по Липецкой (22,4 ц/га). Наибольшая средняя урожайность озимой пшеницы была отмечена для Белгородской области – 26,5 ц/га, для Воронежской она составила 23,7 ц/га, а для Курской – 23,0 ц/га.

По средним данным за последние двадцать лет исследуемого периода, пришедшиеся уже на ХХI в., все пять рассматриваемых областей, исходя из значения C_m , можно рассматривать как районы с наиболее устойчивыми урожаями. Климатическая составляющая изменчивости урожаев C_m везде снизилась, кроме Курской области, где она незначительно выросла на 0,01 до 0,16. Для Белгородской области значение C_m составило 0,15, для Тамбовской – 0,19, для Липецкой – 0,19 и для Воронежской – 0,17. Кроме того, смотря на все три двадцатилетия в целом, можно отметить, что значение C_m меньше всего колебалось именно в Курской области, где оно варьировалось от 0,15 до 0,16. Наибольшая средняя за двадцатилетие урожайность озимой пшеницы была получена опять же по Белгородской области – 36,6 ц/га, в то время как на второе место по этому показателю уже вышла Липецкая область – 34,4 ц/га, немного отстала от нее Курская – 34,2 ц/га, следом Воронежская – 30,4 ц/га, а наименьшее значение получено для Тамбовской области – 29,7 ц/га.

Для большей наглядности динамики климатической составляющей изменчивости урожаев по исследуемым областям на основе данных таблицы 1, а в частности значения C_m , были составлены карты-схемы (рис. 3).



Рис. 3. Оценка изменчивости урожаев озимой пшеницы.
1 – Белгородская область, 2 – Воронежская область, 3 – Курская область,
4 – Липецкая область, 5 – Тамбовская область

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что хоть с годами по всем пяти областям и растет средняя урожайность, а также устойчивость формирования урожаев (исходя из значения C_m), однако в последние годы Воронежская область, видимо, становится менее пригодной для получения стабильных урожаев с высокой продуктивностью озимой пшеницы, в то время как Курская и Липецкая области, наоборот, переживают подъем и в перспективе являются более благоприятными для возделывания озимой пшеницы. Тамбовская же область стабильно выглядит менее благоприятной для получения урожаев с высокой продуктивностью на фоне остальных четырех областей ЦЧЭР, а Белгородская, хоть и бьет рекорды по урожайности озимой пшеницы, в последние годы начинает уступать Курской в благоприятности условий для ее возделывания.

Список литературы

1. Дмитриева Ю. А. Территориальные особенности роли климата в варьировании урожайности сельскохозяйственных культур Беларуси // Вестник национальной академии наук Беларусь. Серия: Аграрные науки. 2005. № 5. С. 85 – 87.
2. Ермакова Л. Н. Климатическая составляющая изменчивости урожаев яровой пшеницы на Урале // Метеорология и гидрология. 2005. С. 100–112.
3. Мустафина А. Б. Основные особенности влияния погодных условий на урожайность зерновых культур в Республике Татарстан // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 2 (372). С. 144 – 153.
4. Пасов В. М. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур. Л. : Гидрометеоиздат, 1986. 152 с.
5. Растениеводство / Г. С. Посыпанов [и др.]. М. : КолосС, 2007. – 612 с.
6. Регионы России. Социально-экономические показатели : стат. сб. М. : Росстат, 2021. 1112 с.
7. Российский статистический ежегодник : стат. сб. М. : Росстат., 2021. 692 с.
8. Сельское хозяйство в России : стат. сб. М. : Росстат., 2021. 100 с.
9. Федорова В. М., Яркова Н. Н., Елисеев С. Л. Растениеводство : учеб. пособие. Пермь : ИПЦ «Прокрость», 2014. Ч. 1. Зерновые и зерновые бобовые культуры. 112 с.
10. Шарипова Р. Б., Сабитов М. М., Орлов А. В. Климатическая составляющая урожаев зерновых культур по зонам Ульяновской области // Вестник Ульяновской сельскохозяйственной академии. 2013. № 3. С. 34–36.

УДК 556

Случаи массового развития интрузий в Южном Байкале и их связь с процессами циркуляции атмосферы

Е. С. Троицкая (elenatroitskaya@lin.irk.ru)^{1,2}, М. Н. Шимараев (shimaraev@lin.irk.ru)¹

¹Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

²Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. По данным наблюдений 1993–2002 гг. рассмотрены случаи массового развития интрузий холодных вод в придонную область Южного Байкала и проанализирована их связь с циркуляцией атмосферы. Анализ выявленных случаев в мае – июне 2018 г. и зимой 2004/05 г. показал, что обновление и насыщение кислородом придонных вод происходит глубже 1230 (380 м³) и 1245 м (340 м³), соответственно. Развитие массовых интрузий весной 2018 г. связано с преобладанием меридионального переноса воздушных масс с Атлантики (АО) при ослаблении циркумполярной циркуляции и зонального переноса с Тихого океана. Зимой 2004/05 гг. развитие массовых интрузий происходило в условиях усиления циркумполярной циркуляции и зонального переноса с Атлантики (EA, NAO) и Тихого океана (PNA, WP).

Ключевые слова: Байкал, интрузии, глубинная конвекция, индексы циркуляции атмосферы.

Введение

Интрузии поверхностных вод в глубинные или придонные слои воды наблюдаются на Байкале перед началом ледостава и после схода ледового покрова, когда происходит смена температурной стратификации вод [1; 2; 10–12; 14; 15]. Интрузии являются следствием глубинной конвекции, которая возникает

при термобарической нестабильности в верхнем слое водной толщи. Поступающий с интрузиями кислород поддерживает жизнь бентосной фауны, а также участвует в геохимических процессах, протекающих в верхнем слое донных осадков [9], и при разложении всплывающих из дна озера газовых гидратов [13].

Явление глубинной конвекции обнаружено в канадских озерах Камлупс (Kamloops, 143 м) и Бабин (Babine, 186 м) в период перед ледоставом [6], в озере Кратер (Crater, USA, 594 м) [5], в японских озерах Товада (Towada, 326,8 м) и Шикоцу (Shikotsu, 363 м) [4].

Показано [2; 14], что в условиях уменьшения температуры максимальной плотности с ростом глубины / давления, в мае-июне после схода льда и в ноябре-январе перед ледоставом в верхнем слое воды (0–300 м) может возникать термобарическая неустойчивость в верхнем слое воды. Она ведет к развитию глубинной конвекции и опусканию интрузий холодных поверхностных вод в глубинные и придонные слои. Причинами неустойчивости могут быть неоднородность поля атмосферного давления, ветры в прибрежной зоне, вызывающие даунвеллинги, и увеличение плотности воды на фронте термобара [10–12].

На Байкале глубинная конвекция достигает больших масштабов, вызывая интрузии вод объемом до 200 км³ в придонную зону озера [7] и обновление вод глубже 250 м за год на 10 % в Южном и Среднем и на 15 % в Северном Байкале [14]. За счет интрузий происходит аэрация вод глубинной зоны [1].

Целью нашей работы было выявить случаи массового развития, оценить их характеристики и проанализировать связь с циркуляцией атмосферы над Южным Байкалом.

Материалы и методы

В работе были использованы данные экспедиционных измерений температуры воды T ($\pm 0,002^{\circ}\text{C}$) и кислорода ($\pm 0,01 \text{ мг/л}$) зондом SBE-25 в феврале – октябре 1993–2021 гг. В 1993 г. измерения выполнялись в районах максимальных глубин Байкала. В остальные годы измерения проходили на 7 станциях продольного разреза по тальвегу озера и на 4 поперечных разрезах в Южном Байкале (24–48 станций) (рис. 1). В период открытой воды в 1993 – июле 2002 г. и с 2018 г. по настоящее время станции на поперечных разрезах находились в 3, 7 км от берега и в середине разреза. В августе 2002–2017 гг. дополнительно измерения проводились 1, 5 и 10 км от берегов. В период ледостава, кроме стандартных станций, измерения выполнялись в 4,5 км от м. Лиственничный и в 3,5 км от м. Ивановский.

В нашем исследовании как интрузии поверхностных вод вследствие глубинной конвекции рассматривались случаи с пониженной температурой воды и повышенной концентрацией растворенного кислорода у дна (рис. 2). Чтобы оценить характеристики интрузий (дефицит тепла $\Delta Q_{(-)}$, высота придонного холодного слоя ПХС h) выявлялись случаи обновления придонных за счет интрузий.

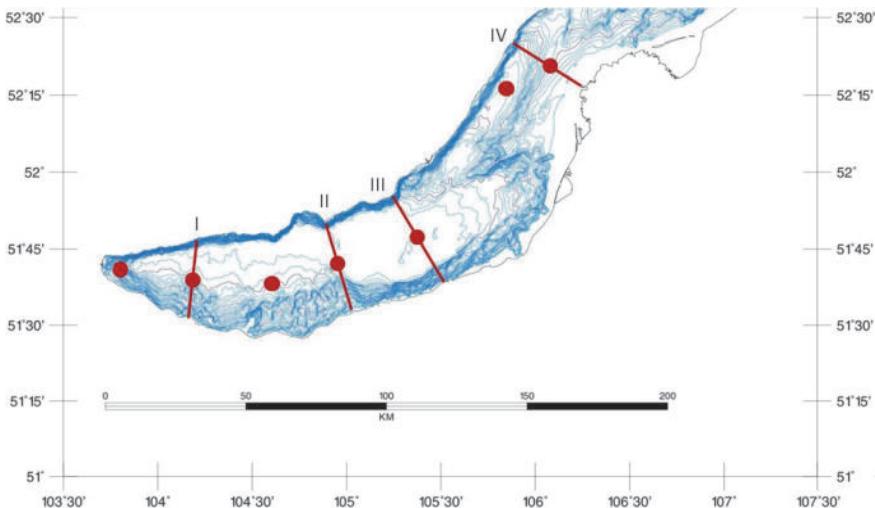


Рис. 1. Схема проведения измерений на продольном (станции 1–22) и поперечных разрезах (I–IV). 1 – 15 км от п. Култук, центральная станция (ц. ст.) п. Маритуй – р. Солзан (I), 3 – ц. ст. м. Толстый – р. Снежная, 4 – ц. ст. п. Листяняк – п. Танхой (II), 5 – ц. ст. м. Кадильный – р. Мишиха (III), 6 – максимальная глубина напротив бух. Песчаная, 7 – ц. ст. м. Красный Яр – прот. Харауз (IV)

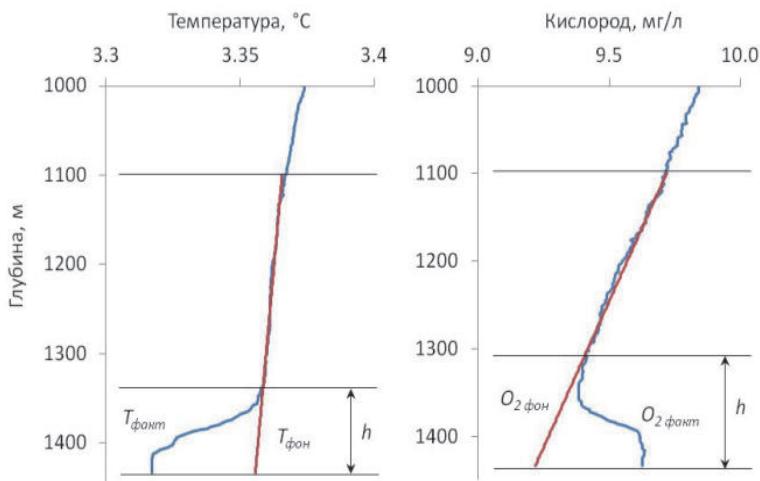


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры воды (слева) и концентрации растворенного кислорода (справа) при интрузиях поверхностных вод в придонную зону (центральная станция м. Кадильный – р. Мишиха, 4 июня 2021 г.)

Признаком интрузий было возрастание (для T) и уменьшение (для O_2) абсолютной величины вертикальных градиентов до 6–8 раз. Тепловой эффект холодных интрузий или дефицит тепла $\Delta Q_{(-)}$ ($\text{МДж}/\text{м}^2$) в слое h (м) рассчитан как разность между фактическим и фоновым (при ненарушенном слое воды в придонной области) теплозапасом слоя:

$$\Delta Q_{(-)} = \rho \cdot C_p \cdot 0,5h \cdot (\Delta T_{\text{факт}} - \Delta T_{\text{фон}}). \quad (1)$$

Величина h определялась по вертикальному распределению T в придонной области (рис. 2), ΔT – средняя измеренная T в слое h , $\Delta T_{\text{фон}}$ – средняя фоновая T в слое h при характерном распределении T в придонной области и в 200–400-метровой толще воды выше обновленного слоя воды (рис. 2). Плотность воды ρ принималась равной 1000 кг/м³, а удельная теплоемкость – 4,19 кДж/(кг·К).

Влияние холодных интрузий на количество растворенного кислорода O_2 выражается величиной превышения его фактического содержания в ПХС над содержанием при фоновом распределении O_2 . Величина поступившего в ПХС количества кислорода ΔO_2 (в г/м²) равна:

$$\Delta O_2 = h \cdot (\Delta O_2_{\text{факт}} - \Delta O_2_{\text{фон}}), \quad (2)$$

где h (м) – высота ПХС, $\Delta O_2_{\text{факт}}$ – средняя измеренная концентрация растворенного O_2 в слое h (мг/л), $\Delta O_2_{\text{фон}}$ – фоновая концентрация O_2 (мг/л) при ненарушенном слое воды в придонной области в слое h (рис. 2).

Чтобы оценить связь развития интрузий с циркуляцией атмосферы, были рассмотрены зависимости $\Delta Q_{(-)}$ с индексами циркуляции атмосферы, известных как Northern Hemisphere Teleconnection Patterns [3], NAO, EA, EAWR, POL, SCAND, WP и PNA в 1993–2021 г. [8].

Результаты

В данной работе рассмотрены два случая массовых интрузий, наблюдавшихся по всей акватории Южного Байкала. Один относится к весенне-летнему периоду 2018 г., когда интрузии были зафиксированы на 20 станциях (табл. 1). Второй случай относится к марту 2005 г. (18 станций, табл. 2).

Таблица 1

Характеристики интрузий 25 мая – 6 июня 2018 г.

Название станции	$\Delta Q_{(-)}$, $\text{МДж}/\text{м}^2$	ΔO_2 , $O_2 \text{ г}/\text{м}^2$	h , м	H , м
Ц. ст. п. Маритуй – р. Солзан	-1,2	4,22	50	1260
3 км от п. Маритуй	-1,88	1,83	56	1338
7 км от п. Маритуй	-1,71	2,37	44	1340
Ц. ст. м. Ивановский – п. Муринко	-2,75	0,2	60	1344
Ц. ст. п. Листвянка – п. Танхой	-9,98	12,67	126	1422
10 км от п. Листвянка	-9,12	11,17	126	1408
7 км от п. Листвянка	-9,85	13,3	128	1406
5 км от п. Листвянка	-9,37	7,85	98	1404
3 км от п. Листвянка	-0,51	4,23	40	1402
Ц. ст. п. Голоустное – п. Бабушкин (в районе грязевого вулкана Маленький)	-1,73	0,69	36	1308

Окончание табл. 2

Название станции	$\Delta Q_{(+)}$, МДж/м ²	$\Delta O_2, O_2\text{ г/м}^2$	h , м	H , м
Ц. ст. м. Кадильный – р. Мишиха	-7,28	6,91	114	1434
7 км от р. Мишиха	-6,16	18,41	120	1362
7 км от м. Кадильный	-7,87	10,05	120	1410
3 км от м. Кадильный	-4,05	7,81	120	1374
7 км от п. Бол. Коты	-39,38	64,5	318	1418
5 км от п. Бол. Коты	-51,31	105,78	198	1408
9 км от п. Бол. Коты	-77,91	107,96	308	1420
2 км ЮЗ от ст. 7 км от п. Бол. Коты	-102,99	164,28	316	1416
1 км СВ от ст. 7 км п. Бол. Коты	-66,68	108,48	214	1418
Макс. Глубина у бух. Песчаная	-4,42	161,31	96	980
Среднее	-20,81	40,70	134	1364

Таблица 2

Характеристики интрузий в марте 2005 г.

Название станции	$\Delta Q_{(+)}$, МДж/м ²	$\Delta O_2, O_2\text{ г/м}^2$	h , м	H , м
Ц. ст. п. Листвянка – п. Танхой	-4,63	18,14	124	1406
Ц. ст. п. Листвянка – п. Танхой	-4,27	17,45	122	1410
7 км от п. Листвянка	-2,07	13,25	62	1394
4,5 км от п. Листвянка	-0,75	10,74	36	1392
3 км от м. Кадильный	-2,42	13,92	76	1250
7 км от м. Кадильный	-2,35	13,79	76	1400
Ц. ст. м. Кадильный – р. Мишиха	-5,18	19,19	70	1424
7 км от р. Мишиха	-1,6	12,36	86	1398
5 км от п. Голоустное	-0,81	10,85	50	1054
10 км от п. Голоустное	-1,24	11,67	58	1232
Грязевой вулкан Маленький	-2,17	13,44	96	1308
3,5 км от м. Ивановский	-0,33	9,93	40	1308
7 км от м. Ивановский	-1,22	11,63	24	1354

Окончание табл. 2

Название станции	$\Delta Q_{(+)}$, МДж/м ²	$\Delta O_2, O_2\text{ г/м}^2$	h , м	H , м
10 км от п. Мурино	-0,78	10,79	38	1008
Ц. ст. от м. Ивановский – п. Мурино	-1,53	12,22	32	1270
3 км от п. Маритуй	-1,44	12,05	46	1326
7 км от п. Маритуй	-0,96	11,14	38	1326
Ц. ст. от п. Маритуй – р. Солзан	-0,76	10,75	38	1250
Среднее	-1,92	12,96	62	1306

С учетом средних значений глубины H и h ПХС объем, поступивших с интрузиями поверхностных вод в глубинную зону, составил 380 и 340 км³ в мае-июне 2018 г. и марте 2005 г. соответственно. Рассчитанные объемы поступивших вод свидетельствуют об обновлении придонных вод глубже горизонтов 1230 и 1245 м соответственно.

Для интрузий, которые развиваются после разрушения ледового покрова, использовались значения индексов циркуляции атмосферы для апреля–октября (рис. 3). Для интрузий, формирующихся в предледоставный период, рассматривались индексы циркуляции за ноябрь – март (рис. 4).

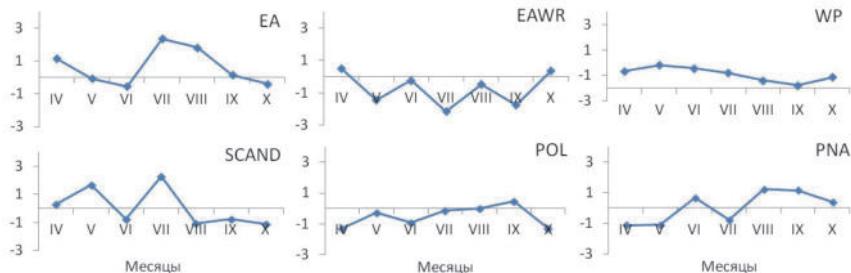


Рис. 3. Изменение индексов циркуляции атмосферы в апреле – октябре 2018 г.

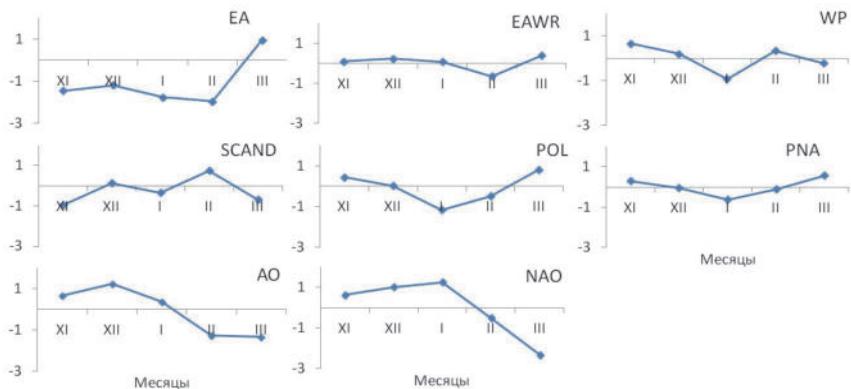


Рис. 4. Изменение индексов циркуляции атмосферы в ноябре 2004 – марте 2005 г.

Периоды были выбраны, с одной стороны, с учетом того, что условия формирования поля температуры, в котором может возникнуть глубинная конвекция из-за термобарической нестабильности, создаются в предшествующие интрузиям месяцы. С другой стороны, после опускания интрузий в придонную область, их влияние на температуру воды и содержание растворенного кислорода в этой части озера прослеживается еще какое-то время. Летом чаще всего до июля – начала августа, как наблюдалось, например, в рассматриваемом 2018 г., но в отдельные годы – вплоть до октября (2000 и 2014 г.). Зимой также влияние интрузий на температуру воды и концентрацию растворенного кислорода может прослеживаться долгое время (зимы 2000/01, 2002/03, 2003/04 и 2004/05 гг.).

Анализ изменений величин индексов циркуляции (рис. 3–4) показал, что в весенне-осенний период 2018 г. сложились условия для преобладающего меридионального переноса воздушных масс над Байкальским регионом (рис. 3).

Наибольший вклад в весенний период 2018 г. (апрель-май), когда создаются условия для формирования интрузий за счет глубинной конвекции, вносил скандинавский механизм (SCAND), блокирующий зональный перенос воздушных масс, и восточно-атлантический механизм меридионального переноса воздушных масс (EA) при ослабленных механизмах зонального переноса (EAWR, WP, PNA, POL) воздушных масс с Тихого океана и Арктики. В июне наблюдалось ослабление как меридионального, так и зонального переноса воздушных масс. Усиление меридионального переноса происходило в июле – августе (EA) при ослабленном зональном переносе (SCAND). В августе – октябре началось усиление зонального переноса (PNA) воздушных масс за счет блокировки переноса воздушных масс из Северо-Тихоокеанского сектора (рис. 3).

В зимний период 2004/05 гг. наоборот – преобладал зональный перенос воздушных масс (рис. 4) из Северной Атлантики (EA, NAO) при одновременном меридиональном переносе воздушных масс с Атлантики (AO) и усилении циркумполярной циркуляции воздушных масс (POL). Перенос воздушных масс с Тихого океана также способствовал усилению зонального переноса (PNA, WP) (рис. 4). Это способствовало созданию условий для формирования интрузий до установления постоянного ледового покрова (ноябрь-январь). Позже (февраль-март) происходило ослабление меридионального переноса воздушных масс с Атлантики (AO) и, при усилении к марта циркумполярной циркуляции, наблюдалось усиление зонального переноса уже с Тихого океана (EAWR, WP, PNA).

Выводы

Анализ случаев развития интрузий холодных вод за счет глубинной конвекции в Южном Байкале в период с 1993 по 2022 г. показал, что наиболее массовые случаи их развития зафиксированы в мае-июне 2018 г. и январе-марте 2004/05 гг. Анализ этих случаев показал, что произошло обновление вод и насыщение их кислородом глубже 1230 и 2145 м, соответственно.

Весной-летом 2018 г. развитие массовых интрузий было связано с преобладающим меридиональным переносом воздушных масс из Атлантики (EA), ослаблении зонального переноса с Тихого океана и циркумполярной циркуляции. Зимой 2004/05 гг. развитие массовых интрузий происходило при одновременном усилении циркумполярной циркуляции и зонального переноса с Атлантики (EA, NAO) и Тихого океана (PNA, WP).

Случаи развития массовых интрузий связаны не с конкретными механизмами циркуляции воздушных масс, но являются следствием сочетания отдельных усиливающих друг друга механизмов, при котором создаются благоприятные условия для развития глубинной конвекции и формирования интрузий.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории гидрологии и гидрофизики ЛИН СО РАН за организацию и проведение экспедиционных работ.

Работа выполнена в рамках гос. темы ЛИН СО РАН 0279-2021-0004.

Список литературы

1. Влияние глубинной конвекции на аэрацию вод придонной зоны Байкала / М. Н. Шимараев, В. М. Домышева, Р. Ю. Гнатовский, В. В. Блинов // География и природные ресурсы. 2016. № 3. С. 70–77.
2. Шимараев М. Н., Гранин Н. Г. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321, № 2. С. 381–385.
3. Barnston A. G., Livezey R. E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns // Mon. Wea. Rev. 1987. Vol. 115. P. 1083–1126.
4. Deep water stratification in deep caldera lakes Ikeda, Towada, Tazawa, Kuttara, Toya and Shikotsu / B. Boehrner [et al.] // Limnol. 2009. № 10. P. 17–24.
5. Crawford G. B., Collier R. W. Long-term observations of deepwater renewal in Crater Lake, Oregon // Hydrobiol. 2007. N 574. P. 47–68.
6. Farmer D. M., Carmack E. C. Wind mixing and restratification in a lake near the temperature of maximum density // J. Phys. Oceanogr. 1981. Vol. 11, N 11. P. 1516–1533.
7. Processes of deep-water renewal in Lake Baikal / Hohmann R. [et al.] // Limnol. Oceanogr. 1997. Vol. 42, N 5. P. 841–855.
8. IRI/LDEO Climate Data Library. URL: <http://iridl.ldeo.columbia.edu> (дата обращения: 24.08.2022)
9. Pogodaeva T. V., Lopatina I. N., Khlystov O. M. Background composition of pore waters in Lake Baikal bottom sediments // J. Great Lakes Res. 2017. N 43. P. 1030–1043.
10. Lake Baikal deepwater renewal mystery solved / M. Schmid [et al.] // Geophys Res Lett. 2008. Vol. 35(L09605). P. 1–5.
11. Shimaraev M. N., Granin N. G., Zhdanov A. A. Deep ventilation of Lake Baikal waters due to spring thermal bars // Limnol. Oceanogr. 1993. Vol. 38, N 5. P. 1068–1072.
12. Drivers of deep-water renewal events observed over 13 years in the South Basin of Lake Baikal / C. Tsimitri [et al.] // J. Geophys. Res. Oceans. 2015. Vol. 120, N 3. P. 1508–1526.
13. Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal / P. Van Rensbergen [et al.] // Geol. 2002. Vol. 30, N 7. P. 631–634.
14. Weiss R. F., Carmack E. C., Koropalov V. M. Deep-water renewal and biological production in Lake Baikal // Nature. 1991. N 6311. P. 665–669.
15. Cold intrusion in Lake Baikal: direct observational evidence for deep-water renewal / A. Wuest [et al.] // Limnol. Oceanogr. 2005. Vol. 50, N 1. P. 184–196.

Секция 6

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 556.512(1-924.81)

О межгодовой изменчивости годового стока реки Печоры

С. М. Гордеева (gordeeva@rshu.ru)^{1, 2}, В. Н. Малинин¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

Аннотация. Обсуждаются выявленные в колебаниях годового стока Печоры различия его временной изменчивости, в частности трендов, за период 1951–2020 гг. в створе Усть-Цильмы. Привлекаются данные об осадках и температуре воздуха на трех метеорологических станциях в бассейне реки. Делается предположение, что в период 1980–2020 гг., сопровождающийся ярко выраженным ростом температуры воздуха в регионе, причиной повышения водности реки является интенсивное сокращение вечной мерзлоты и значительное увеличение мощности сезонно-talого слоя, который вовлекается в сток реки.

Ключевые слова: Печора, сток реки, осадки, рост температуры воздуха, тренд.

Введение

В последние десятилетия на земном шаре отмечается отчетливо выраженное потепление. Однако оно весьма различно в разных регионах планеты. Особенно быстро потепление развивается в северных районах России, прилегающих к Арктике, где линейный тренд температуры воздуха за последние 40 лет составляет $0,5\text{--}0,8^{\circ}\text{C}$ за 10 лет, что более чем в два раза превышает темпы повышения температуры воздуха в Северном полушарии ($0,25^{\circ}\text{C}$ за 10 лет). Естественно, это не может не приводить к значительным изменениям в характере увлажнения поверхности суши и соответственно в стоке северных рек. В связи с интенсивным развитием в бассейнах северных рек экономической деятельности расчет и, особенно, долгосрочный прогноз изменений годового стока приобретает все большую актуальность. В данной работе рассматривается задача выявления генезиса межгодовой изменчивости стока р. Печоры. Из крупных рек ЕТР сток р. Печоры является самым малоизученным. Для р. Печоры характерно преимущественно снеговое питание. Мощное весеннее половодье включает 60–70 % годового объема стока. При этом на снеговое питание стока в среднем приходится 55 %, на дождевое – 25 %, на грунтовое – 20 %. Минимальный сток отмечается в зимний период, когда питание реки осуществляется исключительно за счет грунтовых вод.

Материалы и методы

Годовой сток р. Печора за период 1951–2020 гг. в створе Усть-Цильмы получен в Государственном гидрологическом институте. Дополнительно использовались данные наблюдений на метеорологических станциях. Плотность сети стационарных гидрометеорологических станций в бассейне р. Печоры является самой низкой на ЕТР. Если воспользоваться в качестве источника исходной информации архивом ВНИИГМИ-МЦД (<http://aisori.meteo.ru/ClimateR>), содержащим данные срочных инструментальных наблюдений почти на 500 метеорологических станциях России в основном с 1950 г., то в бассейне Печоры мы находим всего 3 стационарные станции: Нарьян-Мар, Усть-Цильма и Печора. Для

указанных станций по среднемесячным данным с 1950 по 2015 г. были рассчитаны средние значения осадков (корректированные) и с 1950 по 2020 г. – температуры воздуха за холодный (октябрь – март) и теплый (апрель – сентябрь) периоды года соответственно. В расчетах использовались традиционные статистические методы: корреляционно-регрессионные и спектральный анализ.

Результаты и их обсуждение

На рис. дается график изменчивости годового стока Печоры за период 1951–2020 гг. в створе Усть-Цильмы. Нетрудно видеть, что он обладает значительным размахом межгодовых колебаний. При среднем значении стока 4513 м³/с коэффициент вариации составляет 0,147. До 1980 г. отмечался сравнительно маловодный, преимущественно случайный, характер изменений годового стока со средним значением 4098 м³/с. Однако затем начался довольно быстрый рост стока, который характеризуется оценкой тренда равной 12,0 м³/с в год. За 40 лет годовой сток увеличился в среднем на 480 м³/с (табл.). После исключения тренда был выполнен спектральный анализ временного ряда стока. Выявлена одна значимая гармоника (4,1 лет), вклад которой в дисперсию исходного ряда составляет 25 %.

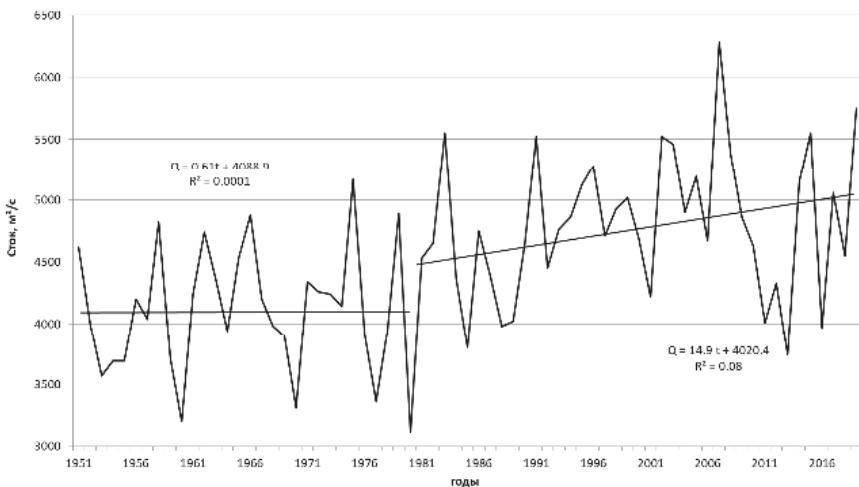


Рис. Годовой сток р. Печоры на водосборе и его локальные тренды

В таблице приводятся статистические оценки линейных трендов годового стока р. Печоры, а также значений осадков и температуры воздуха за холодный (октябрь–март) и теплый (апрель–сентябрь) периоды года усредненных по данным 3 метеорологических станций (Нарьян-Мар, Усть-Цильма и Печора). Помимо стандартных значений коэффициента линейного тренда a_1 ($X = a_1 t + a_0$) и коэффициента детерминации (R^2) представлены оценки безразмерного индекса

тренда I_{mp} , который представляет собой отношение размаха тренда (a_{1n}) к среднему значению характеристики ($|x_{cp}|$) и выражается в условных единицах [6], т. е. $I_{tp} = a_{1n} / |x_{cp}|$, где n – период времени, годы. Так как индекс тренда безразмерная величина, то это удобно для сравнения характеристик разной размерности и даже одной размерности, но значительно отличающихся по абсолютной величине.

Таблица

Оценки линейного тренда годового стока Печоры, усредненных за холодный (октябрь – март) и теплый (апрель – сентябрь) периоды года осадков и температуры воздуха по данным 3 метеорологических станций (Нарьян-Мар, Усть-Цильма и Печора)

Параметр	Коэффициент тренда a_{1n} , год^{-1}	R^2	Размах тренда, a_{1n} (n – кол-во лет)	Индекс тренда, I_{mp} , %
1951–1980 гг.				
Годовой сток Печоры, $\text{м}^3/\text{с}$	0,61	0,000	18,3	0,4
Осадки за холодный период, мм	1,94	0,167	58,2	19,9
Осадки за теплый период, мм	-0,68	0,008	-20,4	6,1
Температура воздуха за холодный период, $^{\circ}\text{C}$	-0,01	0,003	-0,3	2,5
Температура воздуха за теплый период, $^{\circ}\text{C}$	-0,04	0,050	-1,2	18,2
1981–2020 гг.				
Годовой сток Печоры, $\text{м}^3/\text{с}$	12,0	0,056	480,0	10,0
Осадки за холодный период, мм	-0,97	0,041	-38,8	13,2
Осадки за теплый период, мм	-0,04	0,006	-1,6	0,4
Температура воздуха за холодный период, $^{\circ}\text{C}$	0,08	0,169	3,20	29,7
Температура воздуха за теплый период, $^{\circ}\text{C}$	0,05	0,190	2,01	26,9

Примечание: осадки оценивались до 2015 г. включительно.

Из таблицы видно, что первый период времени (1951–1980 гг.) не отличался ярко выраженным трендами практически во всех характеристиках, за исключением увеличения осадков в холодный период, это частично компенсировалось их уменьшением летом, что в целом и определяло незначительный рост стока р. Печоры.

В период 1981–2020 гг. ситуация изменилась: теперь осадки в холодный период имеют слабый отрицательный тренд. За 40 лет произошло их уменьшение на 39 мм. В теплый период года тренд отсутствует. Вообще для водосбора р. Печоры характерно очень низкое суммарное испарение (около 90 $\text{мм}/\text{год}$), что составляет малую величину от суммарного количества выпадающих здесь осадков (около 490 $\text{мм}/\text{год}$). Поэтому сразу же возникает вопрос: почему речной сток заметно увеличивается (на 12 $\text{м}^3/\text{с}$ в год) при некотором уменьшении его главного источника – осадков?

Если обратиться к табл., то нетрудно видеть, что с 1980 г. в бассейне Печоры идет значительное потепление. За 40 лет температура воздуха зимой выросла на 3,2 $^{\circ}\text{C}$, а летом на 2 $^{\circ}\text{C}$. Это полностью соответствует темпам потепления приарктических районов [1]. Вспомним, что большая часть бассейна Печоры находится в зоне многолетнемерзлых пород (вечной мерзлоты) [1; 4]. В последние десятилетия идет ее интенсивное сокращение и значительное увеличение мощности се-

зонно-талого слоя [3], сопровождающееся ростом температуры почвы [2]. В Печорской низменности южная граница мерзлоты сместилась к северу на 30–40 км, вдвое больше – до 80 км на равнинах Приуралья [5; 7]. Очевидно, вовлечение во влагообмен слоя талой почвенной воды стало причиной повышения стока р. Печоры.

Поэтому можно заключить, что температура воздуха становится важным фактором, определяющим рост речного стока в арктической зоне в период глобального потепления.

Заключение

Для годового стока р. Печоры характерна довольно высокая межгодовая изменчивость. Коэффициент вариации составляет 0,15. При этом временной ряд стока является локально нестационарным. До 1980 г. отмечался сравнительно маловодный, преимущественно случайный, характер изменений годового стока со средним значением $4098 \text{ м}^3/\text{с}$. Однако затем начался довольно быстрый рост стока, который характеризуется оценкой тренда равной $12,0 \text{ м}^3/\text{с}$ в год. В результате за 40 лет годовой сток по тренду увеличился в среднем на $480 \text{ м}^3/\text{с}$.

Однако данный тренд не может быть объяснен основным источником стока – осадками, которые немного уменьшаются как в теплый, так и в холодный периоды года. Причиной повышения водности реки является, очевидно, ярко выраженный рост температуры воздуха, вследствие чего происходит интенсивное сокращение вечной мерзлоты и значительное увеличение мощности сезонно-тального слоя, который вовлекается в сток реки.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного контракта FSZU-2020-0009 «Исследование физических, химических и биологических процессов в атмосфере и гидросфере в условиях изменения климата и антропогенных воздействий».

Список литературы

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. 1003 с.
2. Деменков О. В. Динамика изменения температур почв в большегемельской тундре и ее последствия // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 12–10(80). С. 13–17
3. Долгополова Е. Н., Исупова М. В. Многолетние изменения составляющих водного баланса дельт Печоры и Колымы в условиях изменения климата // Евразийский союз ученых. 2022. № 2(95). С. 4–13.
4. Изменение климата в Российской Арктике: риски и новые возможности. ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Центр энергетики московской школы управления СКОЛКОВО, 2022, 105 с. URL: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/14cc56cf-8817-4a71-b9fb-6810b6d2adca/SKOLKOVO_EneC_RU_ClimateArktika.pdf (дата обращения: 06.09.2022).
5. Каверин Д. А., Пастухов А. В., Новаковский А. Б. Динамика глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв (на примере площадки циркумполярного мониторинга деятельного слоя в Европейской России) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 6. С. 35–44.
6. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Изменчивость влагосодержания атмосферы над океаном по спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 3–11.
7. Оберман Н. Г., Шеслер И. Г. Прогнозирование деградации многолетнемерзлых пород (на примере Европейского Северо-Востока страны) // Разведка и охрана недр. 2009. № 7. С. 20–30.

УДК 551.511.33

Воспроизведение региональных особенностей атмосферных процессов в регионе Санкт-Петербурга с учетом реального распределения типов урбанизированной поверхности

Е. М. Ладохина (katur.job@mail.ru)^{1,2,3}, К. Г. Рубинштейн (k.g.rubin@googlemail.com)^{1,4}

¹Гидрометцентр РФ, Москва

²МикроСтен-МИС, Санкт-Петербург

³Северо-Западное УГМС, Санкт-Петербург

⁴Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Аннотация. Проанализированы результаты экспериментов с прогностической численной моделью атмосферы для региона Санкт-Петербург за март, июнь и октябрь 2021 г. Эксперименты проведены с учетом реального распределения типов подстилающей поверхности города и ближайших окрестностей с целью определить влияние этих данных на прогноз приземной температуры. Сделан вывод, что для воспроизведения пространственной неоднородности приземной температуры в различных районах города в численной модели, помимо типизации урбанизированных зон города, требуется определить значения параметров, характеризующих поверхность этих зон.

Ключевые слова: город, численный прогноз погоды, приземная температура, локальные климатические зоны, Санкт-Петербург.

Введение

Особенности региональных атмосферных процессов в городской среде, такие как изменение тепло- и влагообмена атмосферы с сушей, изменение режима циркуляции воздуха, зачастую приводят к негативным последствиям для инфраструктуры города и здоровья его жителей. Одним из способов исследования влияния урбанизации на погодный режим является численное моделирование. В современных численных моделях атмосферы для адекватного описания особенностей атмосферы города разработаны физические параметризации городского полога (например: [6; 7; 9]) – слоя атмосферы, верхней границей которого является уровень крыш зданий, нижней – подстилающая поверхность. Следует отметить, что поверхность города неоднородна, различные участки, в зависимости от плотности застройки, доли зеленых насаждений и некоторых других характеристик, по-разному взаимодействуют с атмосферой.

Поэтому использование современных параметризаций городского полога подразумевает классификацию поверхности города по некоторым признакам, основанным, как правило, на степени урбанизации участков местности. В контексте задачи классификации городских поверхностей по типам широкое распространение поучил подход, основанный на концепции локальных климатических зон (ЛКЗ) [8]. Выделение ЛКЗ позволяет охарактеризовать многообразие сочетаний городской застройки и земельного покрова в городах ограниченным числом

классов, в пределах которых значения параметров подстилающей поверхности остаются постоянными.

Чтобы понять, как данные о неоднородности свойств городской поверхности влияют на поля прогностических приземных метеоэлементов, численные эксперименты с учетом реального распределения типов подстилающей поверхности в регионе Санкт-Петербурга были проведены за различные сезоны. Результаты были сопоставлены с данными с 13 автоматических метеорологических датчиков, расположенных в черте города.

Материалы и методы

Для проведения численных экспериментов использовалась прогностическая региональная модель WRF-ARW версии 4.3. Высокое пространственное разрешение, необходимое для исследования неоднородности приземных прогностических полей на относительно малой площади, было достигнуто путем создания модельной области с вложенными сетками. В результате, пространственный шаг области расчета, соответствующей Санкт-Петербургу с ближайшими окрестностями, составил 0,6 км. Для описания региональных особенностей атмосферы города использовалась интегрированная в WRF-ARW одноуровневая модель городского полога (SLUCM). Поверхность города в SLUCM определяется 3 типами, в зависимости от степени урбанизации. Для каждого типа назначено порядка 20 параметров, вариация которых определяет взаимодействие городской застройки конкретного города с атмосферой.

Точность данных о свойствах поверхности существенно влияет на воспроизведение процессов в приземном слое в численной модели. Чтобы идентифицировать урбанизирована ли ячейка сетки или же покрыта лесами, пахотными землями или водой, в современных численных моделях предусмотрена возможность усвоения нескольких продуктов, содержащих информацию о свойствах поверхности. В разработанной для региона Санкт-Петербург конфигурации использован продукт MODIS IGBP [5] с пространственным разрешением 30 угловых секунд. Разнообразие поверхностей представлено 20 типами, три из которых характеризуют поверхности, измененные человеком, включая 1 тип для описания городской среды.

Область суши вокруг Санкт-Петербурга окружена в основном вечнозелеными и смешанными лесами. В соответствии с классификацией MODIS IGBP, диапазоны значений физических параметров, характеризующие урбанизированную поверхность (тип «Город») и подстилающую поверхность, покрытую лесом (типы «Лес»), в модели, различаются. Значения влагосодержания почвы для типов «Лес» в 3 раза выше, чем для типа «Город», выше диапазоны значений излучательной способности и тепловой инерции. Значения параметров, служащих непосредственно для описания природных поверхностей (листовой индекс, глубина залегания корней) для типа «Город» в несколько раз ниже, чем для типов «Лес». Значения параметра шероховатости совпадают для обоих типов. Схожи диапазоны значений альбедо.

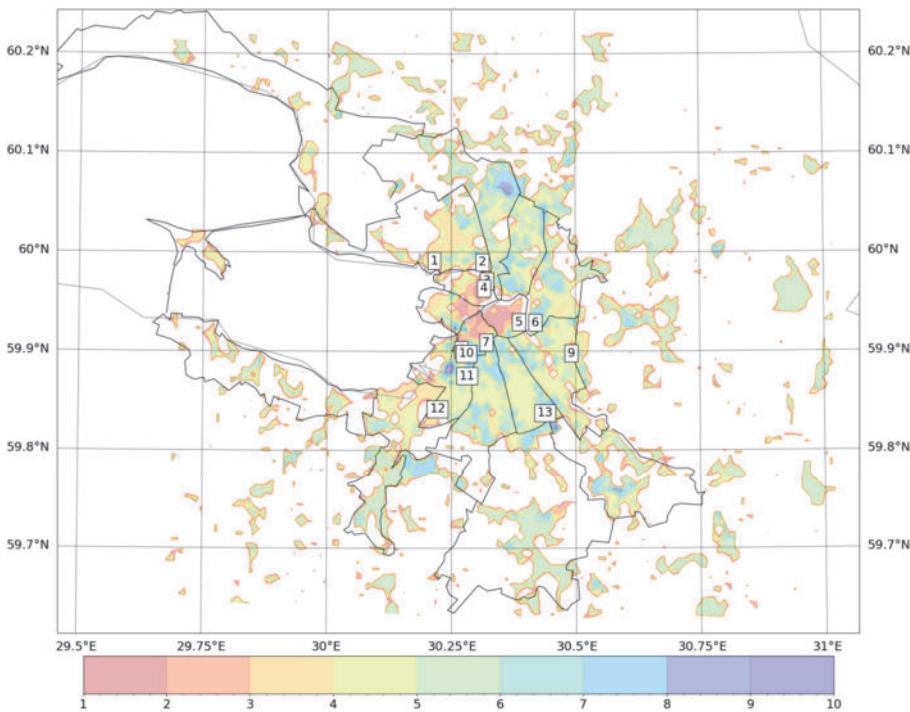


Рис. Распределение ЛКЗ Санкт-Петербурга в конфигурации численной модели

Однако классифицировать город одним типом поверхности недостаточно для получения результатов, пригодных для анализа неоднородности распределения прогнозических значений приземных метеоэлементов в черте города. Доступные по умолчанию в модели городского полога 3-го типа урбанизированной поверхности также не охватывают многообразие типов подстилающей поверхности региона Санкт-Петербург. В связи с этим для представления подстилающей поверхности города в разработанной конфигурации прогнозической модели были использованы данные портала WUDAPT, сформированные фреймворком LCZ Generator [4]. Полученная карта реального распределения свойств подстилающей поверхности, характеризует урбанизированную поверхность суши в регионе Санкт-Петербург в соответствии с концепцией ЛКЗ.

Стандартный набор ЛКЗ включает в себя 10 урбанизированных типов (обозначаются номерами 1–10) и 7 природных типов (A–G). Урбанизированные типы 1–3, характеризуются компактной высоко-, средне- и малоэтажной застройкой соответственно. Пространства между зданиями узкие и в основном покрыты асфальтом без зеленых насаждений. Типы 4–6 характеризуются открытой высоко-, средне- и малоэтажной застройкой. При этом пространства между зданиями широкие и представляют природный водопроницаемый покров (трава, и невысокие

деревья). Принимается, что здания зон 1–6 построены из теплоемких строительных материалов – кирпича, камня и бетона. Описание ЛКЗ 7 практически полностью соответствует зоне 3, с той разницей, что эта ЛКЗ характеризуется значениями, которые соответствуют менее теплоемким строительным материалам зданий (дерево, солома, тонкий металл). Характерными особенностями ЛКЗ 9 являются большие площади открытых зеленых насаждений с редко расположеннымами малоэтажными зданиями. Зоны 8 и 10 покрыты асфальтом. Здания зоны 8 малоэтажные, состоят из теплоемких материалов, пространства между зданиями широкие. Здания зоны 10 – это промышленные сооружения, которые могут быть мало- и/или среднеэтажными.

Согласно поученной карте локальных климатических зон Санкт-Петербурга центральные районы города соответствуют типу 2, большая часть города, непосредственно прилегающая к Финскому заливу, классифицирована как зона 4, на периферии идентифицированы области соответствующие ЛКЗ 5. Между центральной частью города и периферией располагаются участки, покрытые асфальтом с малоэтажными зданиями (зона 8). Урбанизированному типу 6 соответствуют в основном участки поверхности, находящиеся за пределами города, в Ленинградской области. С помощью фреймворка WUDAPT2WRF (W2W) [3] карта распределения ЛКЗ, предварительно адаптированная к расчетной области моделирования, была усвоена в файлы препроцессинга численной модели. Результат проверен на соответствие физическим типам поверхности региона Санкт-Петербург. В качестве контрольных участков выбраны о. Кронштадт и Васильевский остров.

Численные эксперименты с параметрами подстилающей поверхности, заданными по умолчанию для каждой ЛКЗ, проведены за март, июнь и октябрь 2021 г. Рассчитывались серии прогнозов за каждый день указанных месяцев с заблаговременностью 30 ч. Для оценки пространственной изменчивости приземной температуры в пределах Санкт-Петербурга были собраны данные с 13 автоматических метеорологических датчиков в различных районах города (рисунок). Расположение датчиков 8, 4 и 2, 3 соответствует зонам компактной городской застройки (ЛКЗ 1, 2 и 3 соответственно). Расположение большинства датчиков соответствует типам открытой городской застройки (датчикам 5, 10, 12, 13 соответствует ЛКЗ 4; датчикам 6, 11 – ЛКЗ 5; датчику 9 – ЛКЗ 6). Датчику 7 соответствует урбанизированный тип 7.

В марте среднее абсолютное отклонение данных наблюдений с датчиков от данных наблюдений на станции «ОГМС Санкт-Петербург» (отражающей погодный режим города в целом [1; 2]) составляет 1,4 $^{\circ}\text{C}$, наименьшие отклонения обнаружены для датчика 5: 0,6 $^{\circ}\text{C}$; наибольшие – для датчика 13: 2,2 $^{\circ}\text{C}$. Летом, в июне пространственная неоднородность поля приземной температуры наибольшая в проанализированной выборке: 1,7 $^{\circ}\text{C}$; наименьшая величина отклонений (1,2 $^{\circ}\text{C}$) обнаружена для датчика 9 и наибольшая (2,6 $^{\circ}\text{C}$) – для датчиков 5 и 8. В октябре неоднородность поля приземной температуры наименьшая в сравнении с двумя другими месяцами. Среднее отклонение по всем датчикам составило 1 $^{\circ}\text{C}$; для датчика 7 оно было наименьшим: 0,3 $^{\circ}\text{C}$; для датчиков 1, 8,

10 – наибольшим: 1,5 °C. Полученные оценки демонстрируют пространственную неоднородность распределения приземной температуры в различных районах города, а также временную изменчивость величины отклонений в зависимости от времени года.

Результаты

Проанализированы средние за каждый месяц отклонения прогностических значений приземной температуры от фактических. За каждый исследуемый сезон средние отклонения были отрицательными: наибольшая величина отклонений получилась в июне: $-3,5^{\circ}\text{C}$; наименьшая – в октябре: $-1,4^{\circ}\text{C}$; в марте средняя по всем датчикам величина отклонения составила $-2,1^{\circ}\text{C}$. Несмотря на различия в величине пространственной неоднородности поля приземной температуры в различные сезоны, в независимости от месяца точки с минимальной и максимальной величинами отклонения соответствуют одним и тем же датчикам. Максимальные отклонения прогностической приземной температуры от фактических значений наблюдались в точках датчиков 4, 5, 11; минимальные – в точках датчиков 1, 2, 8.

За июнь отклонения для датчиков 4, 5, 11 составили более -5°C ; за март – от $-2,9$ до $-3,3^{\circ}\text{C}$. В октябре величина отклонений в точках этих датчиков составила порядка $-2,5^{\circ}\text{C}$. Проанализировав спутниковую карту поверхности Санкт-Петербурга в окрестностях точек этих датчиков и сопоставив с картой ЛКЗ установлено, что датчики 4 и 11 охарактеризованы своими ЛКЗ (компактная и открытая среднээтажные ЛКЗ соответственно) довольно точно, и границы этих ЛКЗ расположены достаточно далеко от точек датчиков. Датчик 5 больше соответствует более урбанизированной закрытой среднээтажной ЛКЗ и вблизи (в 700 м к востоку от точки станции) протекает Нева.

Величины минимальных отклонений, зафиксированные в точках датчиков 1, 2, 8 составили: в марте $-0,8^{\circ}\text{C}$, $-1,2^{\circ}\text{C}$, $-0,1^{\circ}\text{C}$ соответственно; в июне порядка $2,6^{\circ}\text{C}$; и порядка $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ в октябре. Сопоставив спутниковую карту поверхности Санкт-Петербурга с картой ЛКЗ оказалось, что распределение типов ЛКЗ в окрестностях точек этих датчиков неоднородно. В пределах 1 км от датчика 1 (открытая многоэтажная ЛКЗ) расположены обширная зона полей и открытая водная поверхность; в 700 м к югу от датчика 2 (компактная малоэтажная ЛКЗ) находится слияние двух крупных рек города: Большой и Малой Невки. Наконец в нескольких десятках метрах к северу от датчика 8 (компактная многоэтажная ЛКЗ) располагается парковая зона, площадью порядка 0,6 км.

Выводы

По данным с метеорологических датчиков оценки отклонений приземной температуры в пределах Санкт-Петербурга демонстрируют пространственную неоднородность (вплоть до $2,6^{\circ}\text{C}$ в июне), а также временную изменчивость в зависимости от времени года. Несмотря на различия в величине пространственной

неоднородности приземной температуры в различные сезоны, точки с минимальной и максимальной величинами отклонений прогностических значений от фактических соответствуют одним и тем же датчикам в независимости от месяца.

Результаты анализа численных экспериментов позволяют предположить, что использованные параметры, характеризующие поверхность ЛКЗ в численной модели, не совсем отражают степень урбанизации Санкт-Петербурга. В частности, установлено, что значения параметра высоты зданий для ЛКЗ 4, 5, 6, характеризующих большую часть городской поверхности в численной модели, значительно превосходят значения по умолчанию. В дальнейшем требуется определить оптимальные значения параметров, характеризующих поверхность ЛКЗ.

Список литературы

1. Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л. Облака и вихри – основа колебаний погоды и климата. СПб. : РГГМУ, 2005. 327 с.
2. Ладохина Е. М., Рубинштейн К. Г., Цепелев В. Ю. Определение периодов максимальной интенсивности острова тепла в Санкт-Петербурге для валидации модели численных прогнозов погоды в городе // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 2. С. 109–125.
3. W2W: A Python package that injects WUDAPT's Local Climate Zone information in WRF / M. Demuzere, D. Argüeso, A. Zonato, J. Kittner // Journal of Open Source Software. 2021. Vol. 76, N 7. P. 1–8.
4. Demuzere M., Kittner J., Bechtel B. LCZ Generator: A web application to create Local Climate Zone maps // Frontiers in Environmental Science. 2021. N 9. P. 1–18.
5. MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets / M. A. Friedl [et al.] // Remote sensing of Environment. 2010. Vol. 114, N 1. P. 168–182.
6. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models / H. Kusaka [et al.] // Boundary-layer meteorology. 2001. Vol. 101, N 3. P. 329–358.
7. Masson V. A physically – based scheme for the urban energy budget in atmospheric models / Boundary – layer meteorology. 2000. Vol. 94, N 3. P. 357–397.
8. Stewart I. D., Oke T. R. Local climate zones for urban temperature studies // Bulletin of the American Meteorological Society. 2012. Vol. 93, N 12. P. 1879–1900.
9. The efficient urban canopy dependency parametrization (SURY) v1.0 for atmospheric modelling: Description and application with the COSMO – CLM model for a Belgian summer / H. Wouters [et al.] // Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9, N 9. P. 3027–3054.

УДК 551.583

Климатические риски на территории Сибирского федерального округа

К. А. Лощенко (loshchenko@bk.ru)¹, Е. П. Белоусова (elenapbel@rambler.ru)^{1,2},
С. Ж. Вологжина (svologzhina@gmail.com)¹, А. И. Развозжаев
(kafedrmeteo@yandex.ru)¹

¹Иркутский государственный университет, Иркутск

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Аннотация. Статья посвящена изучению современных тенденций изменений атмосферных осадков во взаимосвязи с вариациями температурного режима, приземного давления, высотных барических полей, потоков влаги в нижней, средней и верхней тропосфере на территории Сибирского федерального округа по данным реанализа NCEP/NCAR за период 1948–2022 гг. Выявлено, что современные тенденции изменений климата на территории исследуемого региона сопровождаются увеличением тепло- и влагосодержания атмосферы на фоне усиления меридиональных потоков тепла и влаги в средней тропосфере, а также ослабления господствующего в холодный период года влияния Азиатского антициклона. Наблюдаемые тенденции определяют увеличение вероятности климатических последствий, проявляющихся в усилении экстремальности климата Сибири, в частности, более частых наводнений и паводков, случаев ухудшения видимости в сильных осадках, более частых туманов, ливней, гроз и выпадения града.

Ключевые слова: климат, климатические риски, температура воздуха, атмосферные осадки, засухи, геопотенциал, Азиатский антициклон.

Введение

Одним из главных критерии оценки условий жизнедеятельности является их соответствие степени благоприятности (неблагоприятности) совокупности природных факторов, создающих обстановку для существования и развития человека на заданной территории. В этом случае условия жизнедеятельности на территории России можно классифицировать по степени их изменения как наиболее благоприятные, благоприятные, условно благоприятные, условно неблагоприятные, неблагоприятные, очень неблагоприятные, абсолютно неблагоприятные [6].

Исследования, проводимые во всем мире, показывают, что в настоящее время наблюдается значительный рост экстремальности климата [8], одним из проявлений которого является увеличение повторяемости и интенсивности волн тепла и холода [2]. По данным американских исследований экономическая продуктивность отдельных дней снижается на 1,7 % на каждый градус Цельсия при температуре выше 15° С [7]. Поэтому особое внимание уделяется определению критериев волн тепла и волн холода и установлению уровней опасности (тревоги), которые передаются соответствующим службам (управление, медицина, полиция, энергетика и т. д.). Для определения волн тепла и холода используются такие критерии, как: понижение средней суточной температуры воздуха на определенную величину, отклонение средней суточной температуры от нормы, изменение температуры воздуха на величину, равную удвоенному среднеквадратическому отклонению или понижение температуры ниже определенного порога [5].

Например, на Европейской территории России пороговые значения минимальной температуры воздуха составляют минус 31 °C на севере и около минус 15 °C на юге, а в Сибири минус 50 °C и минус 35...минус 40 °C соответственно. На Дальнем Востоке пороговые значения немного увеличиваются до минус 43 °C на севере и минус 28 °C на юге.

Повторяемость и интенсивность экстремальных осадков является одними из многих факторов, влияющих на жизнедеятельность населения. Экстремальные осадки зимой увеличивают снегонакопление и способствуют возникновению опасного весеннего половодья. Экстремальные осадки в переходные и летние сезоны года нередко являются причиной катастрофических наводнений. Сильные ливни часто предшествуют вспышкам болезней, передаваемых через воду [9]. По данным [3] на территории России с 1966 по 2012 г. наблюдалось усиление интенсивности экстремальных осадков, что увеличило риск возникновения наводнений. В последние десятилетия количество средних и сильных снегопадов увеличилось на востоке Европейской России и на западе Сибири и уменьшилось на северо-востоке Сибири [1]. Поэтому прогноз долговременных тенденций изменений сумм и интенсивности атмосферных осадков важен, чтобы оценить ожидаемые риски.

В период интенсивного глобального потепления [4] увеличение числа волн тепла характерно для Европейской территории России (ЕТР), Иркутской области и Якутии. В свою очередь рост числа волн тепла и уменьшение экстремальных суточных сумм осадков увеличило пожарную опасность в лесной зоне Восточной Сибири. Волны холода часто отмечались на ЕТР, а также на юге Западной и Средней Сибири. Районы распространения максимальных междусуточных перепадов температуры воздуха и атмосферного давления расположены в северной части ЕТР и в Западной Сибири. Наращение экстремальных суточных сумм осадков отмечалось в Краснодарском крае, на севере ЕТР и в Западной Сибири. Суровые засухи характерны для территории Поволжья и Южного Предуралья. Следовательно, увеличение экстремальности климата произошло почти на всей территории России.

Данные и методика исследования

Климатические риски оценивались на основе комплексного анализа аномалий количества выпавших атмосферных осадков на единицу площади ($\text{кг}/\text{м}^2$), определяющих вероятность аномально влажных и сухих периодов, во взаимосвязи с аномалиями таких метеорологических параметров, как: температура воздуха, приземное давление, высота геопотенциальной поверхности АТ-500 гПа (5 км), зональная составляющая вектора ветра на высоте 5 км, потоки влаги на уровне изобарических поверхностей АТ-850 гПа (1,5 км), АТ-500 гПа (5 км), АТ-250 гПа (10 км).

Методика исследования включала построение и анализ графиков аномалий средних значений метеорологических величин в холодный период года (ноябрь–март) и теплый период года (апрель – октябрь), которые рассматривались как

климатические периоды с характерными для них циркуляционными особенностями. Аномалии рассчитывались по отношению к периоду климатической нормы (1981–2022 гг.).

На рис. 1 показана территория Сибирского федерального округа (СФО), по крайним географическим точкам которой проводился анализ аномалий выпавших атмосферных осадков во взаимосвязи с другими метеорологическими величинами на разных уровнях тропосфера.

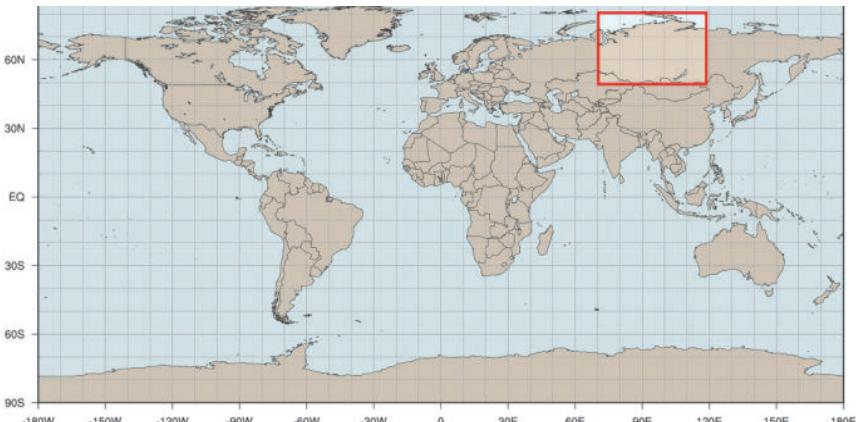


Рис. 1. Границы территории СФО на географической карте, выделенной красным цветом по координатам крайней северной, южной, западной и восточной точек

Результаты исследования

Распределение аномалий атмосферной влаги, выпавшей на единицу площади территории СФО в холодный период года (ноябрь – март) за период 1948–2022 гг., характеризуется увеличением числа лет с положительными аномалиями сумм атмосферных осадков (рис. 2), которые достигали максимальных значений ($1,6 \text{ кг}/\text{м}^2$) в 2020 г. Для сравнения самые «сухие годы» с отрицательными аномалиями, превышающими $1,23 \text{ кг}/\text{м}^2$, приходятся на начало 1968 г.

В теплый период года (май–сентябрь) согласно рис. 3 на протяжении всего рассматриваемого нами периода преобладают отрицательные аномалии сумм выпавших осадков, максимальные значения которых приходятся на начало 1950-х гг. Отличительной особенностью начала XXI в. является увеличение числа лет с положительными аномалиями осадков, которые также максимальных значений ($1,6 \text{ кг}/\text{м}^2$) достигают в 2020 г.

Увеличение сумм атмосферных осадков на территории СФО сопровождается повышением приземных температур воздуха, аномалии которых максимальных значений в холодный ($+3,8^\circ\text{C}$) и в теплый ($+2,4^\circ\text{C}$) периоды года также

достигали в 2020 г. на фоне максимума выпавших осадков. Интересно, что минимумы сумм атмосферных осадков приходятся на годы с минимальными значениями средних температур воздуха в 1960-е и 1970-е гг.

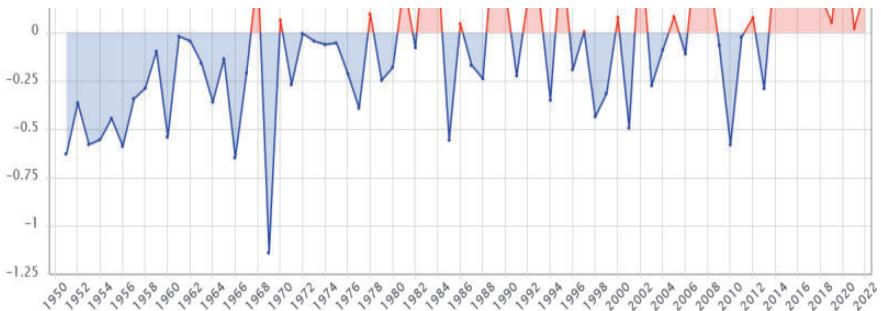


Рис. 2. Изменение аномалий количества выпавших осадков (кг) на единицу площади (m^2) на территории СФО в холодный период года по данным Реанализов NCEP/NCAR за 1948–2022 гг.

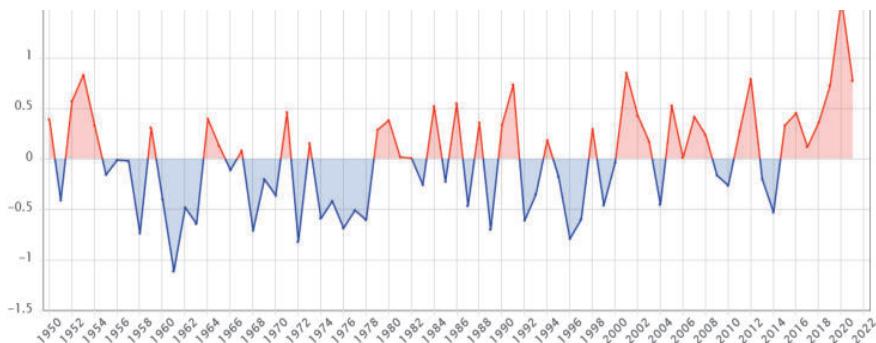


Рис. 3. Изменение аномалий количества выпавших осадков (кг) на единицу площади (m^2) на территории СФО в теплый период года по данным Реанализов NCEP/NCAR за 1948–2021 гг.

Анализируя временную динамику приземного давления, можно выделить следующие особенности. В холодный период года на территории СФО увеличение сумм атмосферных осадков наблюдается на фоне увеличения числа отрицательных аномалий приземного давления, т. е. увеличение осадков происходит на фоне роста средних температур и, как следствие, ослабления зимнего антициклогенеза. В теплый период года возросшая сумма атмосферных осадков отмечается на фоне более выраженного повышения приземного давления, т. е. антициклогенеза.

Увеличение сумм атмосферных осадков в холодный и теплый периоды года происходит не только на фоне роста средних температур воздуха в приземной атмосфере, но и в средней тропосфере, на что указывает рост геопотенциальных высот изобарической поверхности AT-500 гПа (рис. 4, 5).

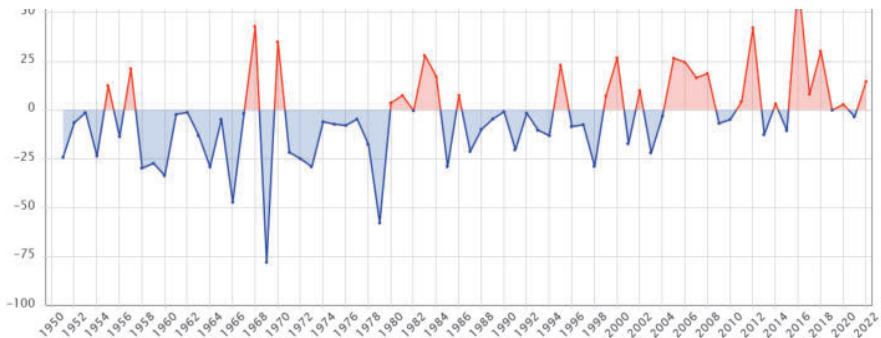


Рис. 4. Изменение аномалий геопотенциальной поверхности AT-500 гПа (глм) на территории СФО в холодный период года по данным Реанализов NCEP/NCAR за 1948–2022 гг.

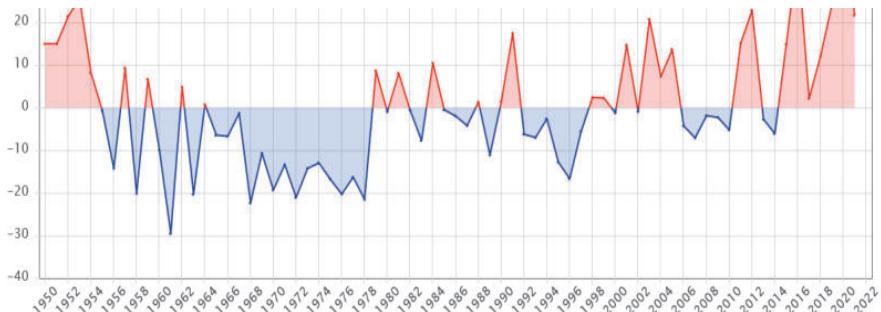


Рис. 5. Изменение аномалий геопотенциальной поверхности AT-500 гПа (глм) на территории СФО в теплый период года по данным Реанализов NCEP/NCAR за 1948–2021 гг.

Установлено, что увеличение сумм выпавших осадков в холодный и теплый периоды года на территории СФО происходит на фоне увеличения в начале XXI в. потоков влаги в основном в нижней тропосфере, тогда как в верхней тропосфере усиливается засушливость климата. Увеличение сумм выпавших осадков в холодный и теплый периоды года в последние десятилетия происходит на фоне усиления меридиональной составляющей ветра на высоте 5 км, что наглядно видно на рис. 6 и 7.

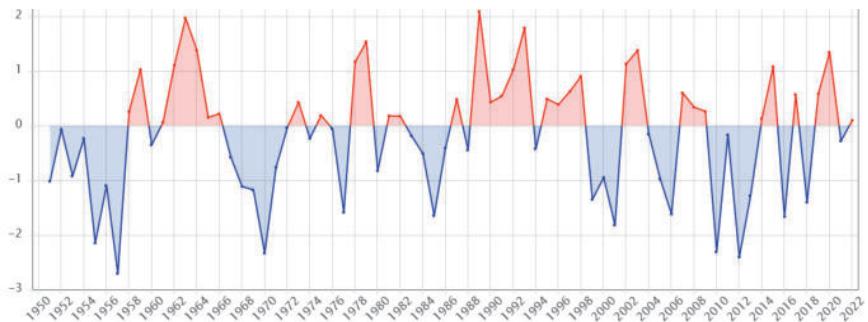


Рис. 6. Изменение аномалий зональной составляющей вектора скорости ветра (м/с) на высоте геопотенциальной поверхности AT-500 гПа (5 км) на территории СФО в холодный период года по данным Реанализов NCEP/NCAR за 1948–2022 гг.



Рис. 7. Изменение аномалий зональной составляющей вектора скорости ветра (м/с) на высоте геопотенциальной поверхности AT-500 гПа (5 км) на территории СФО в теплый период года по данным Реанализов NCEP/NCAR за 1948–2021 гг.

Таким образом, современные климатические условия на территории СФО характеризуются повышением приземных температур воздуха и температуры воздуха в средней тропосфере, т. е. увеличением теплосодержания тропосферы. Увеличение теплосодержания тропосферы сопровождается увеличением сумм осадков в холодный и теплый периоды года на фоне ослабления зимнего антициклогенеза и усиления потоков влаги в нижней тропосфере при усилении меридиональной компоненты ветра в средней тропосфере.

Заключение

Современные климатические условия на территории СФО округа в XXI в. характеризуются увеличением теплосодержания в нижнем 5-километровом слое тропосферы и сумм выпавших осадков как в теплый, так и в холодный период

года. Такие тенденции определяют повышенную вероятность таких климатических рисков, как повышение уровня рек и, как следствие увеличение вероятности наводнений и паводков, ухудшения видимости в сильных осадках, более частые туманы, ливни, грозы и град. Наблюдаемые тенденции увеличения числа теплых и влажных зим происходят на фоне ослабления влияния Азиатского антициклона.

Список литературы

1. Борзенкова А. В., Шмакин А. Б. Изменения толщины снежного покрова и суточной интенсивности снегопадов, влияющие на расходы по уборке магистралей в Российских городах // Лед и Снег. 2012. № 2 (118). С. 59–70.
2. Виноградова В. В. Воздействие климатических условий на человека в засушливых землях Европейской России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2012. № 2. С. 68–81.
3. Золина О. Г., Булыгина О. Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. № 1. С. 84–103.
4. Золотокрылин А. Н., Виноградова В. В. Подход к оценке воздействий изменений климата на жизнедеятельность населения России // Проблемы региональной экологии. 2016. № 5. С. 125–130.
5. Кривцов В. А. Физическая география России. Общий обзор : монография, Рязань : RATL ltd., 2001. С. 70–90.
6. Смирнов П. В., Аликина И. Я. Майские заморозки и взаимосвязь их с волнами холода в Пермской области // Географический вестник. 2006. № 1. С. 95–98.
7. Hsiang S., Deryugina T. Does the Environment Still Matter? Daily Temperature and Income in the United States // National Bureau of Economic Research Working Paper. 2014. P. 20750.
8. Latysheva I. V., Loshchenko K. A., Vologzhina S. Zh. Circulation Factors in Climate Change in the Baikal Region // The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences. 2022. V. 42. P. 119–136. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.42.119>.
9. Miettinen I. T. Waterborne epidemics in Finland in 1998–1999 // Water Science and Technology. 2001. N 43(12). P. 67–71.

УДК 551.583

Климатические изменения на северо-востоке азиатской части России

Д. В. Магрицкий (magdima@yandex.ru)

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. На основе месячных данных по температуре воздуха и слою осадков с 34 метеостанций на северо-востоке азиатской части России и за период 1930–2019 гг. изучена многолетняя и пространственная изменчивость температуры и осадков, определены общие и индивидуальные закономерности. Выявлено значительное климатическое потепление на 1–2 °C начиная с 1988 г. на большей части территории и с середины 1990-х гг. к востоку от р. Индигирки. Указано, что потепление весной и осенью выше, чем летом; пространственная и временная структура изменений слоя осадков более неоднородная; основной вклад в увеличение годовых осадков вносят изменения летних и осенних осадков. Важным итогом работы стало построение карт аномалий сезонных температур воздуха и осадков, многочисленных хронологических графиков.

Ключевые слова: метеостанция, температура воздуха, осадки, многолетние изменения, карты аномалий метеопоказателей.

Введение

Фиксируемые климатические изменения в разных частях нашей страны уже довольно значительны и влияют не только на водный сток рек, но и на их температурный и ледовый режим, на величину и режим стока наносов, особенно в районах распространения вечной мерзлоты. Изучение реакции рек на потепление климата непродуктивно без знаний пространственно-временных закономерностей изменений самих главных метеопоказателей. Для северо-востока азиатской части России такие масштабные исследования были выполнены как раз в контексте детального изучения современной трансформации температуры воды и теплового стока рек этого региона. Полученные результаты совершенно новые и публикуются впервые.

Изучаемый регион

Северо-восток азиатской части России включает полностью Чукотский автономный округ, северные районы Республики Саха (Якутии) и Магаданской области, полностью водосборы Восточно-Сибирского и Чукотского морей, частично водосборы моря Лаптевых, Охотского и Берингово морей. В целом рассматриваемый регион расположен к северу от 60-й параллели. Общая площадь территории равна (без островов) 4,5 млн км², протяженность с запада на восток – около 4200 км, с юга на север – 2000 км. Регион довольно сложный по своим размерам и, главное, по природным условиям. Здесь суровый, в основном, арктический и субарктический климат. Суровость климата увеличивается от морских побережий вглубь материка. Продолжительность холодной половины года 7–8 мес. Зимой превалирует антициклональный тип погоды с ясной и морозной погодой. Среднемесячная температура воздуха в январе варьирует в диапазоне –30...–45 °C (1930–2019 гг.), увеличиваясь в восточном направлении – к тихookeанским побережьям Чукотки и Магаданской обл. – до –17...–25 °C. Оймякон и Верхоянск – полюсы холода России и Евразии (–67,7 °C). Тёплый период года непродолжительный, начинается в мае и завершается в сентябре – октябре. Летом сравнительно теплые и даже жаркие дни чередуются с прохладными ночами. Средняя температура июля (самого теплого месяца) варьирует в диапазоне от +3...+4 °C на арктическом побережье Чукотки и на арктических островах до +11...+15 °C на остальной территории. Максимальная температура воздуха может превысить +33...+35 °C. Сумма годовых осадков в среднем изменяется от 200 до 400 мм, увеличиваясь до 600–800 мм в горах Яно-Чукотской горной провинции к побережьям морей Тихого океана. Максимальное количество осадков фиксируется в теплое время года (июнь – сентябрь/октябрь с пиком в июле–августе), тогда же когда и максимум испарения. На тихookeанском склоне региона доля осенних осадков увеличивается. Территорию отличает сложный рельеф с равнинами и низменностями, плоскогорьями и нагорьями, высокими горами с ледниками. Диапазон высот от 0 до 3000 м над у. м. Многолетняя мерзлота распространена повсеместно.

Исходные данные и их обработка

Информационной основой для анализа пространственно-временных закономерностей климатических изменений на северо-востоке Азиатской части России послужили многолетние ряды средних месячных температур воздуха и месячных слоев осадков на 34 метеостанциях в период с 1930 по 2019 г. (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема расположения опорных метеостанций. Разным цветом показаны территории водосборов морей в пределах изучаемого региона

Брались в расчет температуры воздуха среднегодовые и среднемесячные за весенний, летний и осенний сезоны года, т. е. когда температура воды в реках может быть положительной. Для осадков рассматривались лишь их годовые суммы. Источник метеоданных – Мировой центр данных в г. Обнинске [6]. Отсутствующие (за отдельные годы и месяцы) значения метеопоказателей были восстановлены по надежным и близким аналогам. Обработка метеоданных состояла в построении графиков многолетнего хода температур воздуха и осадков, включая разностные интегральные кривые и расчет линейного тренда, а также в построении карт (методом линейной интерполяции), во-первых, отклонения величин осадков и температуры воздуха в 1981–2019 гг. от величин стандартного периода 1961–1990 гг., во-вторых, величин линейного тренда за период начавшегося потепления. Карты создавались в ArcMap.

Пространственно-временные закономерности изменений температуры воздуха

На северо-востоке Азиатской части России, несмотря на огромные размеры и контрастные природные условия этой территории, заметный рост сред-

негодовой температуры приземного воздуха (ТПВ) фиксируется почти единовременно – с 1988 г., а к востоку от р. Индигирки, включая ее верховья, – с середины 1990-х гг. (рис. 2). Этот момент предваряет (с 1980/1981 гг.) период с близкими к средним климатическим условиям значениями температуры воздуха, а на ряде метеостанций (МС) – даже с положительными температурными аномалиями [4]. С середины 2000-х гг. (чаще с 2005 г.) фиксируется очередное и значительное увеличение годовых ТПВ (восточнее р. Индигирки немного раньше – с 2000/2002 гг.), с новым и скачкообразным повышением в последние 10–5 лет. То есть климатическое потепление продолжает нарастать, как и связанные с ним последствия. Предыдущее масштабное потепление наблюдалось во второй четверти XX в. Оно было частью масштабного регионального процесса, известного в научной литературе как «потепление Арктики». К западу от Индигирки оно было заметнее всего и продолжалось до 1950-х гг.

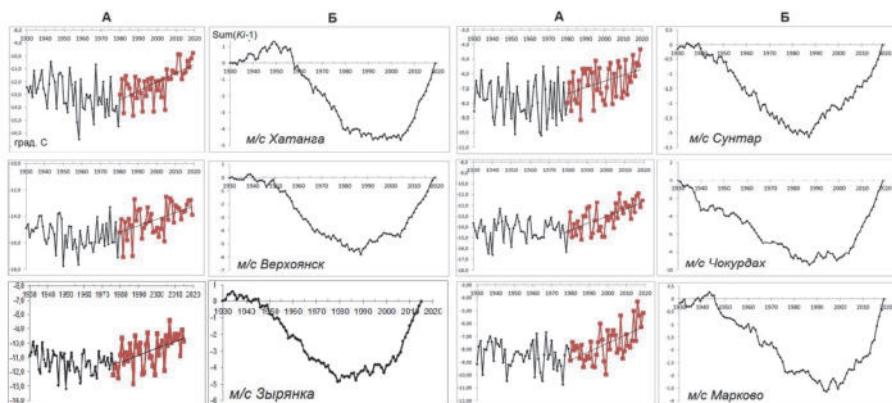


Рис. 2. Графики многолетних колебаний (А) и разностная интегральная кривая (Б) среднегодовой температуры воздуха на разных метеостанциях с линейным трендом за 1980–2019 гг.

Среднее для рассматриваемой территории отклонение ТПВ (аномалия, или АТПВ) в 1981–2019 гг. от нормы, относящейся к общепринятому базовому периоду 1961–1990 гг., составило $\sim 0,8\text{--}1,6^{\circ}\text{C}$, тогда как в 2000–2019 гг. уже $1,2\text{--}2,5^{\circ}\text{C}$. Величина потепления возрастает к бассейну р. Хатанги (до $1,3\text{--}1,4^{\circ}\text{C}$) и особенно к верховьям Индигирки, средней и нижней части бассейна Колымы, восточной части побережья Восточно-Сибирского моря – до $1,4\text{--}1,6^{\circ}\text{C}$ (рис. 3). Далее на восток и юг АТПВ снижается, достигая минимума ($0,8\text{--}1,1^{\circ}\text{C}$) на побережье Берингова и Охотского морей. Похожая пространственная тенденция сохраняется и в XXI в. Коэффициент линейного тренда годовых ТПВ (в 1980–2019 гг.) варьирует в широком диапазоне ($0,4\text{--}1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет), увеличиваясь в северо-западном (к бассейну Хатанги) и северо-восточном (к Чукотскому АО) направлениях (рис. 4). Наименьшая интенсивность потепления характерна для побережья Охотского моря – $0,33^{\circ}\text{C}/10$ лет на МС Магадан.

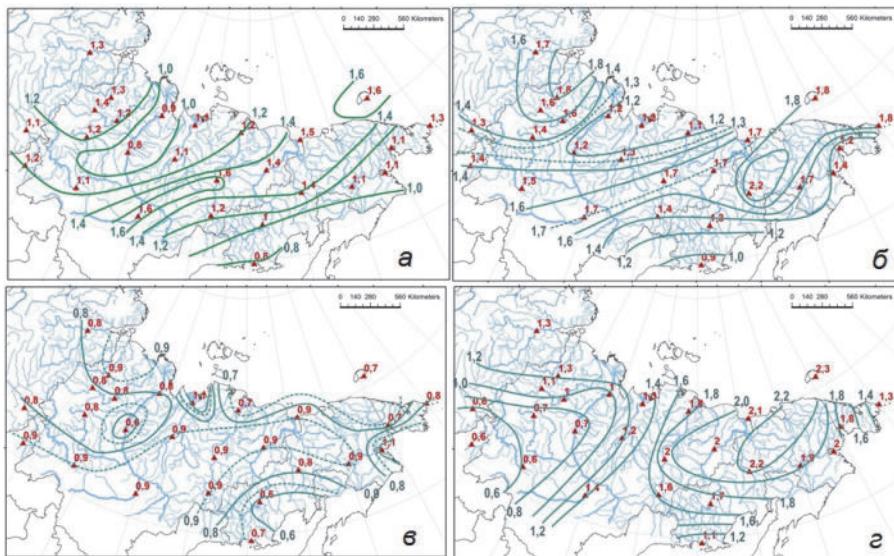


Рис. 3. Карты отклонений температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в 1981–2019 гг. от величины за 1961–1990 гг. а – среднегодовой, б – весеннего сезона, в – лета, г – осени

Современный рост годовых ТПВ обусловлен потеплением во все сезоны года, причем в переходные сезоны увеличение ТПВ существенно выше, чем летом, когда формируется основной тепловой сток рек региона. В весенний сезон АТПВ для 1981–2019 гг. варьируют от 1,0 до 2,2 $^{\circ}\text{C}$, осенью – от 0,5 до 2,3 $^{\circ}\text{C}$, тогда как летом – от 0,6 до 1,1 $^{\circ}\text{C}$. В 2000–2019 гг. сезонные АТПВ выше в 1,5 раза. Как и в случае с годовыми ТПВ хорошо выражены 2 зоны наибольшего роста температур – на северо-западе (бассейны Хатанги и Анабара) и на территориях по оси «Певек – Якутск». Снижение интенсивности роста ТПВ наблюдается к охотоморскому побережью, на юго-запад и для летних ТПВ в низовьях Лены.

Момент первого заметного увеличения летних ТПВ пришелся, главным образом, на конец 1980-х гг., хотя на ряде метеостанций «переломными годами» можно считать рубеж 1970–1980-х гг. Следующее повышение, главным образом, в западной части региона, пришлось на середину 1990-х гг. (в период с 1993 по 1998 г.: на разных МС по-разному), третье – в основном в восточном секторе (с 2000–2004 гг.), четвертое – со второй половины 2000-х гг. На побережье Берингова и Охотского морей, а также в западной части региона соответственно с 2014–2015 и 2017–2018 гг. фиксируется новое и довольно сильное потепление летом. Для остальных календарных сезонов года границы между характерными периодами примерно те же. Величина тренда летних ТПВ попадает в диапазон от 0,3 до 0,6 $^{\circ}\text{C}/10$ лет (рис. 4), возрастаая в северном направлении.

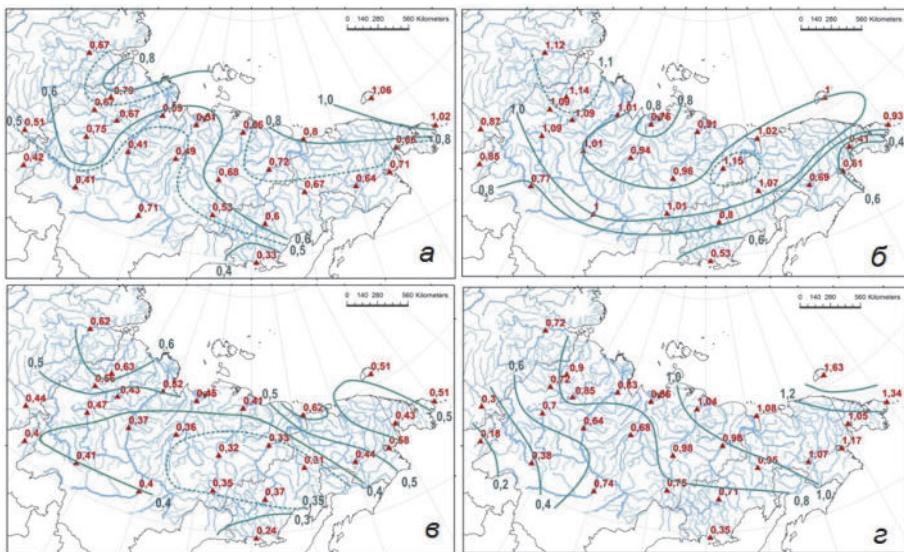


Рис. 4. Карты величины тренда температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/10$ лет) в 1980–2019 гг. для:
а – среднегодовой, б – средней весенней, в – летней, г – осеннеей температур воздуха

Пространственно-временные закономерности изменений осадков

Пространственная и временная структура изменений сумм осадков существенно более неоднородна по сравнению с температурой воздуха. Многолетние колебания осадков на разных метеостанциях, даже на соседних, слабо связаны между собой: в большинстве случаев коэффициент корреляции $r < 0,5\text{--}0,6$. Первая причина – сложная физическая природа, многофакторность явления и физико-географическое строение региона; вторая – низкое качество исходных данных, содержащих как случайные, так и систематические погрешности. Роль первого рода ошибок в величинах сезонных и годовых сумм осадков существенно меньше, чем систематических ошибок измерений. Они возникают при замене дождемера на осадкомер Третьякова (1950-е гг.), изменениях числа сроков измерений (с 1966 г. вместо четырехсроковых наблюдений стали проводить восьмисроковые), при ветровом недоучете твердых осадков, потерях осадков на смачивание цилиндра, испарение и др.

Попытки получить однородные временные ряды атмосферных осадков, исправив измеренные осадки с учетом основных систематических погрешностей [1; 3; 6], не всегда приводят к удовлетворительному результату. Тем не менее, такая масштабная работа для 457 метеостанций страны и периода 1936–2010 гг. была Росгидрометом проведена. В дальнейшем число станций было увеличено. Минимизировать влияние различных факторов на точность значений осадков можно, например, используя лишь одну, официально признанную, поправку на

смачивание и осадки, измеренные после 1951–1955 гг., т. е. по осадкометру конструкции Третьякова.

Несмотря на перечисленные сложности, в изменчивости осадков удалось выявить следующие важные закономерности:

– Для доминирующей и внутриматериковой части региона современный период 1981–2019 гг. характеризуется в целом повышенной величиной осадков, которая в среднем на 10–20 мм больше суммы осадков в 1961–1990 гг. с максимальными отклонениями в 40–60 мм (рис. 5).

– Зоны с отрицательными аномалиями (причем в довольно широком диапазоне значений – от –4 и вплоть до –50...–90 мм) занимают побережье арктических морей, северное побережье зал. Шелихова и Пенжинской губы (Охотское море), а также часть Центрально-Якутской равнины с г. Якутском.

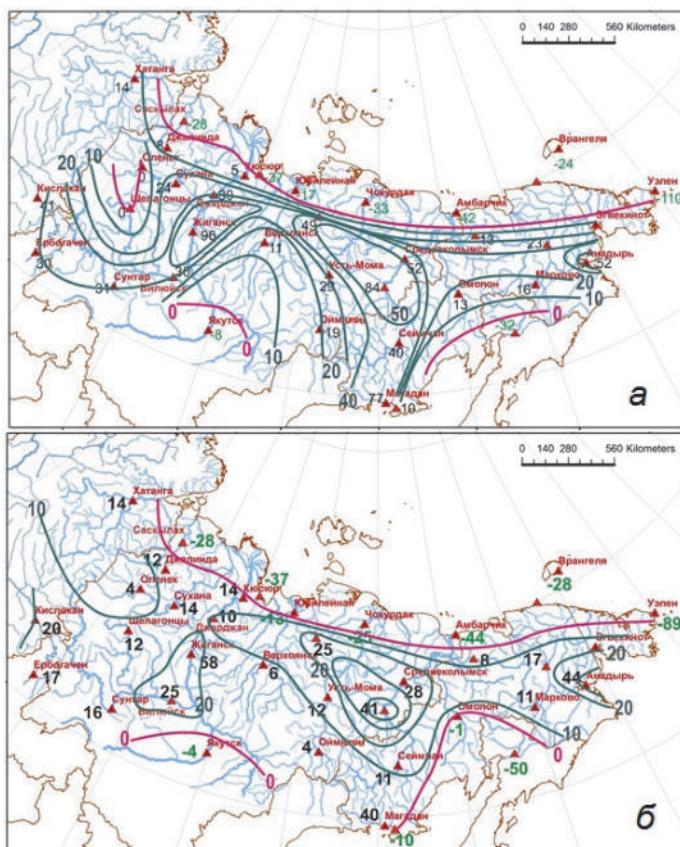


Рис. 5. Карты отклонений годового слоя осадков (мм) в 1981–2019 гг. (а) и 2000–2019 гг. (б) от величины в 1961–1990 гг.

– Многолетним колебаниям слоя осадков присуща некоторая времененная волнообразность (рис. 6). В западной части региона и на побережье морей рост годовой суммы осадков наблюдался раньше – с середины – конца 1980-х гг. В Яно-Колымском районе оно фиксируется, в основном, позже – с середины 1990-х гг. (и даже еще позже). Следующий этап увеличения осадков, как правило, более выраженного, пришелся на западе на середину – конец 1990-х гг., а в восточном секторе – с середины 2000-х гг. Однако в конце 2000-х гг. и в последнее десятилетие на большинстве метеостанций побережья арктических морей и на западе региона произошло заметное уменьшение количества осадков.

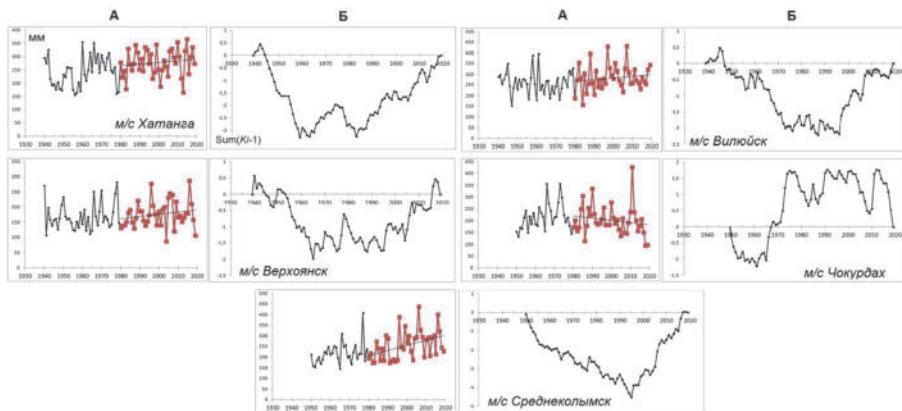


Рис. 6. Графики многолетних колебаний (А) и разностная интегральная кривая (Б) годового слоя осадков на разных метеостанциях с линейным трендом за 1980–2019 гг.

– Отклонения годовых сумм осадков в 2000–2019 гг. от величины базового периода выше, чем для всего 1981–2019 гг.: средняя величина – 10–30 мм, максимальные значения – 50–95 мм. Зоны с отрицательными аномалиями сохранили свое положение (правда охотоморская и якутская уменьшились в размерах), но, вероятно, появилась еще одна – в верховьях рек Вилой и Оленек.

– Зона с наибольшими положительными аномалиями годовой суммы осадков с центром в средней части бассейна Колымы, по сути, совпадает с зоной наибольшего роста годовой ТПВ, что свидетельствует о наиболее масштабных климатических изменениях в этой части региона и неоднозначных последствиях для гидрологического режима рек криолитозоны. Тогда как в других районах, действует, главным образом, стандартное правило: похолодание сопровождается увеличением осадков (и соответственно расходов воды) и наоборот.

– Основной вклад в увеличение годовой суммы осадков вносят в большинстве случаев изменения в летний и осенний сезоны года, в первую очередь в Яно-Колымском районе. Это должно увеличивать число, расходы и объем стока летне-осенних паводков, а вместе с ростом температур воздуха – эрозию почвогрунтов, берегов и существенный рост стока наносов. Согласно результатам исследований для бассейна р. Лены и прилегающих территорий [4], в 1980–

2013 гг. количество осадков в летний и осенний сезоны увеличивалось примерно на 47 и 34 % соответственно. Вклад весенней составляющей составил 15 %, а зимней – всего 4 %. В бассейне Лены на многих МС зафиксированы отрицательные аномалии количества зимних осадков. Другая выявленная особенность заключается в очень нечетких пространственно-временных закономерностях многолетнего колебания суммы количества осадков за весенний и зимний сезоны.

Выводы

Таким образом, несмотря на огромные размеры и контрастные природные условия северо-востока Азиатской части России, заметное потепление (на 1–2° С) фиксируется почти единовременно – с 1988 г., а к востоку от Индигирки – с середины 1990-х гг. С середины 2000-х гг. – очередной и значительный рост температур с новым повышением в 2010-х гг. Потепление усиливается к бассейну Хатанги и в особенности к верховьям Индигирки, средней и нижней части бассейна Колымы, восточному сектору побережья Восточно-Сибирского моря. Рост годовых температур воздуха обусловлен потеплением во все календарные сезоны. Причем в переходные сезоны потепление выше, чем летом, когда формируется основной тепловой сток рек региона. Пространственная и времененная структура изменений слоя осадков существенно более неоднородна. Тем не менее, для основной части региона 1981–2019 гг. характеризуются в целом повышенной величиной осадков – в среднем на 10–20 мм больше, чем в 1961–1990 гг. Зоны с отрицательными аномалиями занимают побережье арктических морей, северное побережье Охотского моря, а также часть Центрально-Якутской равнины. Основной вклад в увеличение годовой суммы осадков вносят, главным образом, изменения в летний и осенний сезоны года.

Направленные и заметные изменения ТПВ и осадков в регионе, безусловно, должны были соответствующим образом повлиять на температурный и водный режим рек северо-востока Азиатской части России [2; 4; 5].

Благодарности. Работы выполнены в рамках грантов РФФИ № 18-05-60021 и РНФ № 21-17-00181 (для бассейна Лены).

Список литературы

1. Богданова Э. Г., Гаврилова С. Ю. Устранение неоднородности временных рядов осадков, вызванной заменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова // Метеорология и гидрология. 2008. № 8. С. 87–102.
2. Василенко А. Н., Маццикий Д. В., Фролова Н. Л. Закономерности изменений среднегодовой температуры воды рек Арктической зоны России в связи с изменениями климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 8. С. 8–22.
3. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М. : Росгидромет, 2014. 1017 с.
4. Маццикий Д. В. Факторы и закономерности многолетних изменений стока воды, взвешенных наносов и теплоты Нижней Лены и Вилюя // Вестник Московского университета. Серия 5, География. 2015. № 6. С. 85–95.
5. Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб. : РИАЛ, 2021. 190 с.
6. ВНИИГМИ-МЦД. URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 15.08.2021).

УДК 551.506.8

Влияние синоптических процессов на миграцию птиц в районе аэродрома Пулково

А. О. Нестерова (lina01nesterova@mail.ru), О. В. Волобуева
(ovvolobueva@rshu.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Цели исследования – определить синоптические ситуации во время перемещения птиц и исследовать их миграции по времени суток и сезонам за 2021 г. в районе аэропорта Пулково. Данный аэропорт актуален для анализа, поскольку находится в зоне миграции птиц и рядом проходит южная ветвь Беломоро-Балтийского пролетного пути. На аэродроме часто встречаются чайки (озерные, серебристые), куропатки, стрижи, дрозды, пустельги, канюки и другие виды птиц, которые создают опасность для воздушных судов.

Ключевые слова: миграция птиц, аэродром, синоптические процессы, авиация, орнитологическая обстановка.

Введение

Частота ССП возросла с развитием реактивных двигателей, поскольку скорость ВС увеличилась и уменьшился шум перед двигателями, птицам стало труднее уклоняться от столкновения [2]. Они стали попадать в реактивные двигатели, что приводит к их полному отказу, возникновению «язычка» пламени или к разрушению. А также врезаться в окна в кабине пилотов, оставляя трещины или разбивая их, в крыло, носовые части, фюзеляж и обтекатели антенн (рис. 1).



Рис. 1. Разбитое окно в кабине пилотов при столкновении с птицей

Орнитологическое обеспечение. Общие положения

Орнитологическое обеспечение полетов – это комплекс мероприятий, направленный на предотвращение столкновений воздушных судов (ВС) с птицами [2].

В данный комплекс мероприятий в российской и международной практике для предотвращения скопления птиц входит:

- 1) сокращение или ликвидация деревьев, кустарников и других растений, а также скашивание травяного покрова на летном поле;
- 2) применение методов для отпугивания и обнаружения птиц с периодическим чередованием этих методов;
- 3) ликвидация увлажненных и заболоченных участков на территории аэродрома;
- 4) устранение городских свалок промышленных и продуктовых отходов;
- 5) оперативное оповещение экипажей ВС о скоплении и массовых перелетах птиц, обнаруженных на пути движения ВС и т. д.

Экипажи ВС получают информацию об орнитологической обстановке от органа организации воздушного движения (ОВД) или при помощи радиовещательных передач АТIS. Сообщается информация о месте обнаружения птиц и по возможности о направлении их полета.

Один раз в пять дней проводится эколого-орнитологическое обследование, в задачи которой входит во время наблюдений за птицами устанавливать маршруты, высоту, интенсивность их полета.

К выполнению мероприятий могут привлекаться [2]:

- *работники органа ОВД*: осуществляют визуальный контроль в секторах взлета и посадки, радиолокационный контроль в секторе захода ВС, сообщают экипажам и ответственному персоналу наземных служб о скоплениях и перелетах;
- *ответственный персонал наземных служб*: наблюдает за птицами, своевременно информирует органы ОВД в целях своевременного предупреждения экипажей, принимает меры для отпугивания;
- *инспектор по безопасности полетов*: учитывает и анализирует случаи столкновения ВС с птицами, информирует вышестоящее руководство, представляет данные о повторяемости случаев столкновения в различных условиях;
- *работники инженерно-авиационных служб*: выявляют и передают инспектору по безопасности полетов сведения о поврежденных ВС, при необходимости передают останки птиц на исследование;
- *инженер по орнитологическому обеспечению полетов*: осуществляет руководство, организует взаимодействие между службами аэропорта, анализирует и прогнозирует орнитологическую обстановку и т. д.

В 2015 г. Росавиацией была введена система докладов обо всех случаях столкновения с птицами вне зависимости от последствий для предоставления операторам аэродромов исходных данных для анализа рисков орнитологической обстановки в районе аэродрома.

Способы отпугивания птиц

1. *Биоакустическое отпугивание*. Включает в себя крики хищников, тревоги. Продолжительность одной трансляции составляет 15–30 с с паузами по 10–20 с. При применении данного способа нужно учитывать погодные условия, поскольку встречный и боковой ветер, осадки (дождь) уменьшают дальность звучания сигнала.

2. *Отпугивание с помощью пиротехнических акустических средств*. Осуществляется выстрелами в сторону птиц на таком расстоянии, чтобы ракета пролетела поблизости от них. Также применяют ружья, специальные пугачи, в которых автоматически взрывается газ (применяют редко из-за низкой эффективности).

3. *Визуальные отпугивания* (пугала, флаги, ленты, огни, воздушные змеи в виде ястребов и др.) (рис. 2).



Рис. 2. Диско-шар и гром-пушка для отпугивания птиц

4. *Отпугивание с помощью беспилотных летательных аппаратов*. Проводится по согласованию с ОВД.

5. *Радиоэлектронное и электромагнитное отпугивание и объединенные автоматизированные системы управления птицами*. Используется для уменьшения привыкания и повышения эффективности других методов отпугивания. Применяется в соответствии с законодательством о санитарном эпидемиологическом благополучии населения.

6. *Использование обученных соколов и патрульных собак*.

Этапы полета, на которых происходят столкновения

Столкновение птиц с ВС происходят на различных этапах полета. Наиболее частые случаи Росавиацией отмечаются на малых высотах, чаще при наборе высоты и заходе на посадку.

Влияние синоптических процессов на миграцию птиц

Л. Ф. Назаренко и Л. А. Амонским были введены такие понятия синоптических процессов как «стимулирующие» и «блокирующие», т. е. процессы, которые стимулируют или блокируют миграцию птиц [1].

Массовые перемещения птиц стимулирует теплая зима, ранняя весна и простые метеорологические условия, которые формируются на западной периферии антициклонов, в теплых секторах циклонов или между переходными зонами циклонов и антициклонов. Осенью перемещения наблюдаются при ранних похолоданиях, вторжениях арктического воздуха в тыловой части циклонов и по восточной периферии антициклонов.

Перемещение птиц блокируют циклоны и атмосферные фронты, характеризующиеся порывами ветра, зонами турбулентности, туманами, низкой облачностью.

Минимальная интенсивность миграции выпадает на дни, когда наблюдаются грозы и ливни.

Физико-географическое и климатическое описание района аэродрома (аэропорт Пулково)

Аэродром находится в 15 км на юг-юго-запад от г. Санкт-Петербурга. Расположен на Приневской равнине, простирающейся с запада на восток от побережья Финского залива до Ладожского озера. Крупных лесных массивов в районе аэропорта нет. Заболоченные почвы занимают около 50 % территории района.

Аэропорт располагается в зоне переходного климата – от морского к континентальному. Активная циклоническая деятельность, частая смена воздушных масс, чаще всего приходящих с Атлантического океана, создает постоянную смену погодных условий.

Отмечается преобладание ветров западного направления.

Анализ орнитологической обстановки

Для анализа орнитологической обстановки по сезонам, времени суток и синоптическим ситуациям в районе аэродрома, были использованы данные по зафиксированным случаям происшествий, составленные орнитологом из аэропорта Пулково.

На рис. 3 представлена повторяемость перемещения птиц по сезонам в аэропорту Пулково за 2021 г. На графике видно, что наибольшее количество зафиксированных случаев в 2021 г. наблюдалось осенью (39 %) и меньше всего весной (13 %). Наибольшее количество случаев осенью обуславливается хорошей погодой, преимущественно перифериями, гребнями и центрами антициклиона, что способствует активной миграции.

Также была рассмотрена повторяемость случаев перемещения птиц по времени суток в аэропорту Пулково за 2021 г., представленная на рис. 4.

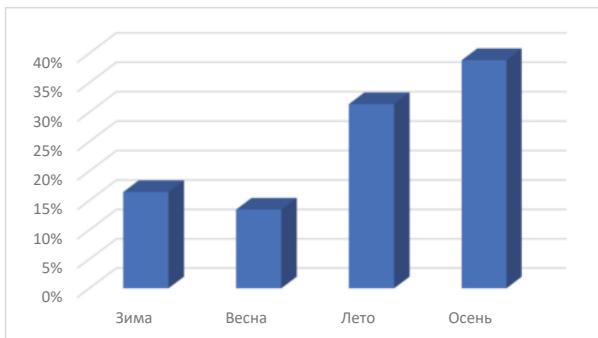


Рис. 3. Повторяемость перемещения птиц по сезонам в аэропорту Пулково за 2021 г.

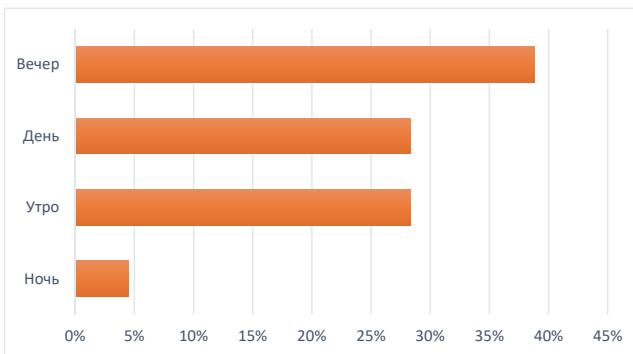


Рис. 4. Повторяемость случаев перемещения птиц по времени суток в аэропорту Пулково за 2021 г.

На рис. 4 можно увидеть, что перемещения птиц в районе аэродрома наблюдались чаще всего вечером (39 %) и меньше всего ночью (4 %). Наибольшее количество происшествий в вечернее и наименьшее в ночное время может быть связано с птицами, остановившимися на отдых или ночлег или активными в данное время суток.

На рис. 5 представлен пример типовых синоптических ситуаций в дни, когда были зафиксированы перемещения птиц за 2021 г. в аэропорту Пулково.

Наибольшее количество случаев перемещения птиц наблюдалось в дни, когда аэропорт находился под влиянием периферии циклонов и антициклонов (30 %), тыловых и передних частей циклонов (18 %), наименьшее – в седловинах и центрах циклона (по 3 %).

Наибольшее количество случаев на периферии антициклонов можно объяснить малооблачной и сухой погодой, иногда могут наблюдаться осадки и сильные ветра, которые будут приостанавливать перемещение птиц; на периферии циклонов – облачная с прояснениями погода, возможное влияние другого барического образования, а также осадки.

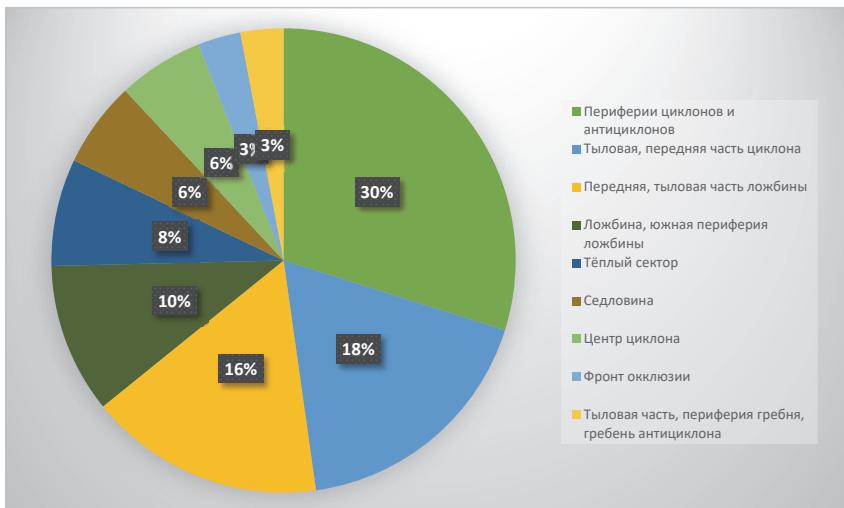


Рис. 5. Типовые синоптические ситуации в аэропорту Пулково за 2021 г.

Достаточно большое количество случаев в тыловых и передних частях циклона можно объяснить приближением теплого или прохождением холодного фронтов, изменением скорости и направления ветра, при ухудшении погодных условий отмечается снижение высоты перемещения птиц, либо остановка пролета.

На рис. 6 представлен пример синоптической ситуации на приземной карте погоды при зафиксированных случаях миграции птиц в районе аэродрома Пулково 19 сентября 2021 г. за 12 UTC. Аэропорт находился под влиянием южной периферии циклона, которая характеризуется облачностью верхнего яруса, умеренным ветром, которые могут способствовать скоплению птиц в районе аэродрома.

Заключение

В представленной работе, на основе данных орнитологической службы аэропорта Пулково, было проведено исследование по сезонам, времени суток и синоптическим ситуациям за 2021 г., которые привели к перемещению птиц. По сезонам в 2021 г. больше всего случаев было зафиксировано осенью (39 %) и меньше весной (13 %). По времени суток перемещения птиц в районе аэродрома наблюдались чаще всего вечером (39 %) и меньше всего ночью (4 %).

Анализ синоптических ситуаций, при которых возникали миграции, показал, что чаще случаи наблюдались на периферии циклонов и антициклонов (30 %) и в тыловых и передних частях циклона (18 %), наименьшее – в седловинах и центрах циклона (по 3 %).

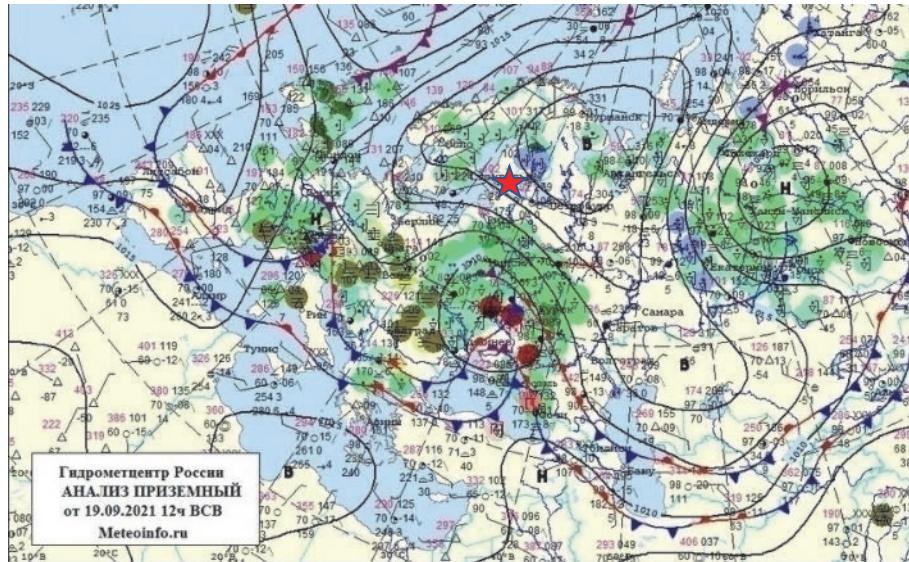


Рис. 6. Приземная синоптическая карта за 19.09.2021, 12 UTC
(южная периферия циклона)

В результате проведенного анализа можно отметить, важность информации о метеорологической обстановке, характеризующейся изменением метеорологических характеристик, которые могут способствовать либо блокировке миграции и скоплению птиц на аэродроме, либо стимулированию птиц к полетам, в том числе на больших высотах, что создает опасные ситуации для полетов воздушных судов.

Список литературы

1. Назаренко Л. Ф., Амонский Л. А. Влияние синоптических процессов и погоды на миграцию птиц в Причерноморье. Киев ; Одесса : Вища школа, 1986. 183 с.
2. Этапы становления авиационной орнитологии как науки / У. П. Зырянова, В. С. Гусарова, Т. В. Миронова, Е. Blatnaya. Ульяновск : Ульянов. гос. техн. ун-т, 2021. С. 39–43.
3. Борьба с опасностью, создаваемой живой природой. Ч. 1 // Федеральные авиационные правила «Правила эксплуатации аэродромов гражданской авиации».

Секция 7

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ
НАБЛЮДЕНИЙ**

УДК 551.501.7

Соответствие качества аэрологических данных потребностям российских пользователей

А. М. Балагуров (a.balagurov@mail.ru)

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» Росгидромета, Долгопрудный, Московская обл.

Аннотация. Аэрологические данные являются основой для анализа и прогноза погоды, метеорологического обеспечения авиации и вооруженных сил, других форм оперативного обслуживания населения и народного хозяйства. Точность, необходимый объем и своевременность получения этих данных определяет высокое качество прогнозов погоды, что позволяет снизить риски угрозы жизни населения, ущерба экономике страны от опасных гидрометеорологических явлений. Система радиозондирования Росгидромета не в полной мере отвечает потребностям российских пользователей, особенно – на севере и северо-востоке России в части несоответствия минимально необходимого количества станций, надежности и объема получаемой информации. Обеспечение соответствия качества работы сети радиозондирования согласованным потребностям российских пользователей должно достигаться с учетом необходимых характеристик пространственно-временного разрешения, своевременности, стабильности, единобразия и презентативности наблюдений. В работе обсуждаются сведения о состоянии и необходимости повышения качества работы сети радиозондирования, варианты обеспечения качества аэрологических данных потребностям российских пользователей.

Ключевые слова: аэрологическая сеть, качество данных, точность, эффективность, потребности пользователей.

Современное состояние системы аэрологических наблюдений

Аэрологические наблюдения – неотъемлемый компонент Глобальной системы наблюдений (ГСН) Всемирной метеорологической организации (ВМО), являясь при этом самым дорогостоящим и ресурсоемким видом синоптических наблюдений. Спектр деятельности в области гидрометеорологии, для которой требуются аэрологические данные, включает анализ и прогноз погоды, в том числе – прогноз опасных гидрометеорологических явлений, метеорологическое обеспечение авиации и Вооруженных Сил, других форм оперативного обслуживания населения и народного хозяйства, мониторинг и обнаружение изменчивости климата, прогнозирование климата во всех временных масштабах, моделирование климата [1].

Радиозондирование включает в себя несколько важных составляющих: технические средства, методика проведения радиозондирования, контроль качества наблюдений, персонал аэрологических станций (АЭ), выполняющий выпуск и сопровождение радиозонда в полете, прием и обработку данных, завершающийся отправкой данных в форме аэрологической телеграммы в мировые центры данных [3]. Не все эти составляющие функционируют успешно, ниже приведены основные проблемы и варианты устранения недостатков в работе аэрологической сети.

Наблюдательная сеть радиозондирования (114 станций на территории России, в том числе – 12 станций в Арктике) является основным средством получения аэрологических данных. Результаты аэрологических измерений поступают в государственный фонд и международный обмен данными о состоянии природной среды. Сеть радиозондирования Росгидромета не в полной мере отвечает требованиям обнаружения климатических изменений в свободной атмосфере (выше пограничного слоя), особенно на севере и северо-востоке России.

В Руководстве по климатологической практике ВМО [5] сформулированы следующие основные требования к наблюдениям для мониторинга долгосрочных изменений в верхних слоях атмосферы:

- а) многолетний (несколько десятилетий), стабильный, однородный во времени ряд данных, чтобы изменения можно было с уверенностью назвать истинными атмосферными изменениями, а не изменениями в системе наблюдений, или артефактами, связанными с методами обеспечения однородности;
- б) высокое разрешение по вертикали для описания вертикальной структуры температуры, водяного пара, изменений на уровне тропопаузы;
- с) достаточный географический охват и разрешение по территории, чтобы можно было определить надежные глобальные и региональные тренды;
- д) точность наблюдений должна быть выше ожидаемых изменений в атмосферных условиях, чтобы можно было четко определить, как изменчивость, так и долгосрочные изменения. Это требование представляет особую важность для наблюдений за водяным паром в верхней тропосфере и стратосфере.

Также в Руководстве ВМО [5] отмечены несколько проблем, касающихся качества радиозондовых измерений для целей мониторинга климата и обнаружения изменений климата. Погрешности, обусловленные солнечной радиацией, рождают неопределенности в измерении температуры. Оперативные радиозонды не способны измерять водяной пар с достаточной точностью при низких температурах. Типы датчиков, особенно датчиков влажности, со временем изменились. Многолетний ряд данных радиозондовых наблюдений имеет многочисленные недостатки, связанные с недостаточным количеством взаимосравнений различных типов радиозондов и установленных на них датчиков, и различием в размещении датчиков в конструкции радиозондов.

Указанные проблемы не могут быть решены стандартными методами обеспечения единства измерений. Радиозонд является средством измерения (СИ) разового действия и в лабораторных условиях невозможно воспроизвести весь комплекс величин, влияющих на результаты измерений, измерения являются косвенными, динамическими и однократными, отсутствуют эталонные средства измерения, имеющие необходимые диапазоны измерений, динамику и возможность учета влияющих факторов [2]. Сопоставимость радиозондовых наблюдений обеспечивается соответствием средств измерения – радиозондов – установленным техническим и метеорологическим требованиям, соблюдением методики проведения измерений, обработки и представления результатов.

Согласно международным нормам, все страны – члены ВМО ответственны за поддержание систематических и надежных аэрологических измерений. Каждая страна обязана произвести в реальном времени необходимые измерения и получить данные для международного использования, и имеет также возможность использовать информацию, полученную в других странах. На Земле около 850 аэрологических станций обеспечивают получение и передачу один или два раза в сутки радиозондовых данных в закодированной форме для глобального обмена в реальном времени. Национальные метеорологические службы непрерывно работают, чтобы обеспечить мониторинг погоды и климата для их собственных стран и Всемирной службы погоды ВМО.

Показатели качества аэрологических данных

Точность полей объективного анализа и, следовательно, успешность численных гидродинамических прогнозов погоды напрямую зависят от качества и полноты данных высотного зондирования атмосферы. Российские оперативные радиозонды не соответствуют требованиям по диапазону и точности измерений, имеют значительные дополнительные погрешности (радиационные погрешности измерения температуры и влажности, динамические погрешности, влияние осадков на измерения температуры и влажности, влияние температуры на измерения влажности и т. д.), которые в свою очередь имеют значительную изменчивость в зависимости от условий измерения, что существенно увеличивает неопределенность результатов радиозондирования [2]. Поправки, вводимые в показания датчиков оперативных радиозондов, имеют большую неопределенность, а использование радиозондов без датчиков давления для определения вертикального распределения давления принципиально не дает возможности обнаружения отклонений в вертикальном распределении давления, поскольку при этом используется интегрирование уравнения гидростатики.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 16 ноября 2020 г. № 1847 «Об утверждении перечня измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений» установлены метрологические требования к измерениям температуры и влажности при радиозондировании.

Соответствие этим требованиям является основой для участия РФ в международном обмене аэрологическими данными. Погрешности, записанные в свидетельствах на тип СИ, выдаваемых Росстандартом, в 2–3 раза меньше, чем предельно допустимые. Однако фактически российские оперативные радиозонды не соответствуют требованиям по диапазону и точности измерений, имеют значительные дополнительные погрешности, их реальные погрешности в 2–3 раза хуже установленных Постановлением № 1847 предельно допустимых погрешностей [2].

Таблица 1

Требования к диапазонам и предельно допустимым погрешностям измерения температуры и влажности при аэрологическом зондировании атмосферы

N	Измерения	Обязательные метрологические требования к измерениям	
		Диапазон измерений	Предельно допустимая погрешность
Основные измерения при осуществлении деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях			
9. 21	Измерение температуры воздуха при аэрологическом зондировании атмосферы, °C	от минус 90 до 50 °C	от поверхности Земли до уровня 100 гПа: $\Delta = \pm 1,25$ °C; на уровнях выше 100 гПа: $\Delta = \pm 2,5$ °C
9. 22	Измерение относительной влажности воздуха при аэрологическом зондировании атмосферы, %	от 0 до 98 %	от поверхности Земли до уровня тропопаузы: $\Delta = \pm 15$ %

Оценка качества аэрологических данных обеспечивается путем сравнения данных наблюдений с данными краткосрочного прогноза на срок наблюдений, получаемого с помощью современной численной модели, основанной на непрерывном усвоении данных. Статистика этих отклонений «наблюдения – поле первого приближения» (OB-FG) стала основой для долгосрочного мониторинга качества данных [1]. Данные статистики отклонений OB-FG (в основном, по геопотенциалу) используются ВМО в мониторинге сопоставимости аэрологических данных, как основной источник для обзора качества всемирной сети радиозондирования. Полученная по данным на стандартных изобарических поверхностях, она представляет собой интегральный показатель качества радиозонда и наземной станции для измерений температуры, давления и высоты.

Прогностическая значимость отдельного выпуска возрастает с ростом высоты уровня окончания зондирования. На этот показатель влияют два фактора – надежность и качество радиозондов и наземной системы, и качество радиозондовых оболочек, высота разрыва которых определяет объем получаемых радиозондовых данных.

Описание процедур расчета статистических характеристик отклонений OB-FG размещены на сайте головной организации Росгидромета по радиозондированию – ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория» (<http://cao-ntcr.mpt.ru/monitor/doc/procs.htm>) – ЦАО. Там же размещаются результаты расчета показателей функционирования аэрологической сети Росгидромета. В январе 2020г. количество АЭ Росгидромета по взвешенному среднеквадратичному значению «наблюдение–прогноз» для геопотенциала в слое 1000–100 гПа, которое превышает критический уровень – 48 гПм (геопотенциальных метров), составило 23, а в целом в первом квартале 2020г. этот показатель составил 16 станций (табл. 2, выборочный список АЭ). В таблицу также внесены данные по средней высоте зондирования (H) по конкретной станции и в целом по России в январе и 1-м квартале 2020 г.

Таблица 2
Среднеквадратичное значение «наблюдение – прогноз» для геопотенциала ($OB-FG$) в слое 1000–100 гПа и средняя высота зондирования (H)

Наименование АЭ	УГМС	$OB-FG$, янв. 2020 г., гПм	H , янв. 2020 г., км	$OB-FG$, 1-й кв. 2020 г., гПм	H , 1-й кв. 2020 г., км
Воейково	Северо-Западное	53	29,1	68	29,8
Тура	Среднесибирское	48	14,0	51	19,8
Омолон	Чукотское	50	26,6	54	26,0
Чокурдах	Якутское	61	17,2	56	18,0
Оленек	Якутское	78	19,5	57	20,7
Верхоянск	Якутское	104	23,1	83	22,8
Мирный	Якутское	51	22,2	56	23,0
Олекминск	Якутское	64	25,9	57	25,2
Среднее по РФ	Всего 114 АЭ	38	24,5	37	24,9

При этом значительную часть «сомнительных» (т. е. поставляющих «бесполезные» данные) станций составляют АЭ Арктического региона России.

В табл. 3 приведены средние отклонения геопотенциальных высот от прогноза для зарубежных и российских систем зондирования. Видно, что до уровня 5 км качество данных российских зондов примерно в 2 раза хуже, на уровне 16 км – в 2,5–3 раза, и на уровне 21 км качество данных российских систем в 3–4 раза хуже качества зарубежных данных.

Таблица 3
Среднеквадратичное значение «наблюдение-прогноз» для геопотенциала ($OB-FG$) в слое 1000–100 гПа и средняя высота зондирования (H)

Системы зондирования	500 гПа (~5 км)	100 гПа (~16 км)	10 гПа (~21 км)
Vaisala, Финляндия	7–9	11–14	12–20
Sippican, США	8–12	13–16	15–18
KHP	10–13	20–25	25–32
Россия	15–18	30–40	45–58

Вторым важнейшим показателем качества работы аэрологической сети, в части получаемого объема данных, является высота радиозондирования, которая в значительной степени определяется качеством радиозондовых оболочек. По результатам зондирования, приведенным в табл. 2, видно, что, например, в январе 2020 г., три аэрологические станции – Тура, Чокурдах и Оленек не превысили среднюю высоту зондирования 20 км. На АЭ арктических УГМС в зимние периоды 2015–17 гг. наблюдалось существенное снижение средней высоты зондирования. Для ряда станций средняя высота зондирования в зимние месяцы не превышала 20 км. В результате, например, в декабре 2017 г. среднемесячные значения высот зондирования в целом (по всем АЭ) по Северному и Среднесибирскому УГМС составили соответственно 19,9 и 19,2 км. В декабре 2017 г. – январе 2018 г. наблюдалось критическое снижение высот зондирования на ряде станций, включенных в глобальную опорную сеть радиозондирования ВМО –

станций ГУАН. Пример – аэрологическая станция о. Диксон, станция ГУАН, январь 2018 г. – средняя высота – 18,8 км. При этом большинство радиозондов не долетели до высоты 20 км. То есть недополучены все данные радиозондирования выше этого уровня.

Соответствие качества аэрологических данных обоснованным требованиям российских пользователей

В последние годы существенно повысились чувствительность общества и народного хозяйства к изменениям в погоде и запросы потребителей к составу, точности и оперативности аэрологической информации, что обуславливает необходимость дальнейшего развития, повышения точности измерений и достоверности получаемых результатов, предоставления аэрологической информации с высоким разрешением.

Анализ качества работы сети радиозондирования Росгидромета показал, что точность полей объективного анализа и, следовательно, успешность численных прогнозов погоды, оценки текущего состояния, наличия и своевременного предупреждения об опасных явлениях, напрямую зависят от качества и полноты оперативной информации, полученной с помощью сети радиозондирования.

Технический регламент ВМО [4] устанавливает требования к членам ВМО в части пользования интегрированной глобальной системы наблюдений (ИГСНВ):

1. Основной целью ИГСНВ является удовлетворение развивающихся потребностей Членов ВМО в данных наблюдений.

2. Члены ВМО должны брать за основу согласованные потребности пользователей в отношении данных наблюдений для определения и осуществления надлежащих оценок эффективности и успешности работы. Важно получить ясное представление о том, насколько пользователи удовлетворены данными наблюдений.

3. Члены ВМО должны осуществлять мониторинг и оценку соответствия и качества своих наблюдений по мере их производства, с тем, чтобы сравнивать их характеристики с согласованными потребностями.

4. Соответствие потребностям пользователей. Сети наблюдений следует проектировать таким образом, чтобы они могли соответствовать согласованным потребностям пользователей в качестве получаемых данных измерений с учетом необходимых характеристик пространственно-временного разрешения, неопределенности, своевременности, стабильности, единобразия и презентативности наблюдений.

Эти необходимые требования и характеристики должны лежать в основе анализа и обеспечения соответствия качества работы российской сети радиозондирования согласованным потребностям российских пользователей (Гидрометцентр, Авиаметтелеком, ГГО, МО и др.).

Сейчас необходимо знать, насколько качество работы сети радиозондирования отвечает обоснованным требованиям российских пользователей. Для обеспечения того, чтобы сети наблюдений соответствовали ключевым потребностям

пользователей, эти согласованные потребности следует учитывать при проектировании сети наблюдений.

Только после квалифицированного обсуждения со специалистами должны приниматься решения о допуске этой продукции на сеть. Такой подход необходим еще и для того, чтобы у Росгидромета была возможность влияния на возможные отклонения от законодательства в области метрологии. Например, в свидетельства на тип СИ радиозондов органы Росстандарта включают данные, которые им представляют изготовители. Эти показатели не соответствуют реальным погрешностям. В частности, в соответствии с российским законодательством в области метрологии все радиозонды, применяемые на сети гидрометслужбы, должны пройти испытания на утверждение типа СИ в рамках утвержденной в России Государственной поверочной схемы для СИ влажности газов (ГПС). Однако в ГПС отсутствуют эталоны для определения метрологических характеристик измерений влажности радиозондов в реальных условиях радиозондирования.

Для обеспечения соответствия качества работы российской сети радиозондирования согласованным потребностям российских пользователей необходимо:

- получить четкое обоснование соответствия/несоответствия текущего количества и расположения АЭ Росгидромета и сформулировать необходимые (допустимые) изменения в конфигурации сети;
- обосновать/подтвердить оптимальные погрешности измерений по высоте, температуре, влажности, скорости и направления ветра;
- сформулировать заключение, является ли объем получаемых данных на всей сети в виде 2-разового зондирования минимально необходимым, или он может быть сокращен (в какой степени), или должен быть увеличен (при каких условиях);
- обосновать требования к минимально необходимой высоте аэрологического зондирования, а также в каких условиях она может быть изменена;
- обосновать требования к непрерывности данных аэрологического зондирования для оперативных прогнозов погоды и для климатических наблюдений, определить максимальное время простоя каждой станции и отсутствия данных с нее.

На основании сформулированных и согласованных потребностей российских пользователей, кроме повышения качества данных, в дальнейшем могут быть сформулированы предложения по оптимизации работы аэрологической сети.

Варианты обеспечения качества аэрологических данных потребностям российских пользователей

В 2019 г. специалисты ЦАО разработали документ «Основные направления модернизации и обеспечения работы аэрологической сети Федеральной службы по гидрометеорологии и контролю окружающей среды (программа действий на период до 2024 г.)», который, в силу обстоятельств, не был принят руководством Росгидромета, как «руководство к действию» [3]. Последний раз аналогичный документ был разработан более 20 лет назад и утвержден приказом

Росгидромета от 21.01.1998 № 12. В настоящее время с учетом необходимости импортозамещения эта программа должна быть адаптирована и утверждена.

Одним из ключевых вопросов повышения качества аэрологических данных является обеспечение необходимых диапазонов и точности измерений системы радиозондирования в соответствии с нормативными документами. В условиях импортозамещения для этого необходимо разработать и обеспечить производство в России современных высокоточных датчиков температуры и влажности для радиозондов, соответствующих лучшим мировым образцам. При этом следующим этапом должно стать возобновление производства в Росгидромете радиозондов повышенной точности с использованием таких датчиков.

Для решения задачи улучшения пространственного разрешения аэрологических данных, особенно в Арктическом регионе, необходимо восстановление законсервированных станций с разработкой соответствующего плана и определением соответствующего финансирования. Важным шагом на пути повышения качества работы Сети может стать преобразование АЭ Долгопрудный в первую в России станцию ГРУАН (реперной сети радиозондирования ВМО). На основании обращения Росгидромета в Секретариат ГСНК ВМО Центр ГРУАН включил ФГБУ «ЦАО» в сеть ГРУАН в качестве кандидата. Включение станции в сеть ГРУАН осуществляется по результатам процедуры сертификации, предусмотренной Наставлениями ВМО (ГСНК № 170) и Руководством по ГРУАН (ГСНК № 171). В настоящее время работы по преобразованию АЭ Долгопрудный в станцию ГРУАН приостановлены в связи с отсутствием соответствующего финансирования. Создание российской станции ГРУАН будет вкладом Российской Федерации в исследования климата свободной атмосферы и обеспечит сбор и представление в Государственный фонд климатических рядов высокоточных данных, получаемых с российских и зарубежных станций ГРУАН. После сертификации станции ГРУАН в ЦАО работы по расширению этой сети могут быть продолжены на нескольких других станциях отечественной Сети.

Первоочередные мероприятия по повышению качества работы сети радиозондирования Росгидромета:

1. Необходимо переоснащение минимум 65 АЭ с истекшим сроком эксплуатации АРВК на навигационные комплексы, что потребует дополнительных затрат на расходные материалы.

2. Увеличение количества станций в Арктическом регионе позволит улучшить качество прогнозов по Северному морскому пути.

3. Повышение требований к точности измерений аэрологических параметров будет стимулировать производителей к выпуску более качественных радиозондов.

4. Повышение требований к высоте зондирования в Арктике зимой потребует применения более качественных оболочек, прошедших испытания.

5. Освоение новейших мировых технических и технологических достижений для создания и производства радиозондов с российскими датчиками, соответствующими лучшим мировым образцам.

6. Создание Центра сертификации и испытаний – ЦСИ в ЦАО позволит организовать контроль за допуском новых средств измерений к применению на наблюдательной сети Росгидромета и повысить качество измерений.

Задача восстановления системы контроля качества производства, сертификации и закупки радиозондов является одной из ключевых задач. Для решения этой проблемы необходимо законодательно установить особый порядок допуска технических средств радиозондирования к эксплуатации на Государственной наблюдательной сети, предусматривающий предварительное одобрение головной организацией – ФГБУ «ЦАО» Росгидромета, в том числе – срочное решение вопроса об обязательном участии Росгидромета в государственных испытаниях на утверждение типа средств измерений, рекомендуемых к применению в сфере гидрометеорологического обеспечения, с проведением, при необходимости, натурных испытаний. В частности, в области аэрологии – обязательные сравнения с радиозондами повышенной точности.

В случае создания в системе Росгидромета аккредитованного Центра сертификации и испытаний аэрологических средств измерений на ЦАО должны быть возложены функции Государственного центра испытаний средств измерений в закрепленной области деятельности. Одновременно, важным фактором может стать участие ЦАО в метрологическом надзоре за состоянием производства радиозондов в качестве базовой организации Метрологической службы Росгидромета.

С целью более полного удовлетворения требований потребителей в объеме данных радиозондирования в перспективе целесообразно предусмотреть следующее [3]:

- определить и контролировать на всех АЭ минимальную высоту зондирования, удовлетворяющую службу прогнозов и основные потребности народного хозяйства.

- обеспечить 95 %-ное достижение уровня 5 гПа (35 км) на АЭ, включенных в сеть ГУАН ГСНК в сроки 00 и 12 ВСВ;

- определить в составе всей сети внутреннюю сеть пунктов зондирования, которая с гарантией могла бы обеспечить один (ночью) или два раза в сутки 95%-ное достижение уровня 10 гПа (не менее 21 км).

Учреждение на длительный период реперных аэрологических станций с расширенной программой, обеспечивающих получение непрерывных многолетних однородных наблюдений высокого качества, сопоставимых по качеству с наблюдениями зарубежных станций ГРУАН, необходимых для своевременных оценки и прогноза тенденций изменения климата в Российской Федерации и на планете Земля для обеспечения безопасного и устойчивого развития Российской Федерации в условиях изменения климата, позволит обеспечить мониторинг эффективности реализуемых мер, в том числе с установлением количественных показателей.

Одним из ключевых вопросов является обеспечение необходимых диапазонов и точности измерений системы радиозондирования в соответствии с нормативными документами. В существующих условиях для этого необходимо:

1. Создать орган (комиссию, комитет) в Росгидромете, отвечающий за соответствие средств и методов, используемых на наблюдательной сети, его основным принципам деятельности – соответствие задачам охраны здоровья населения, защиты окружающей среды и обеспечения безопасности.

2. Пользователям данных сети радиозондирования необходимо разработать и представить в Росгидромет ясные и обоснованные формулировки требований к качеству данных сети радиозондирования.

3. Принять предложения ЦАО о разработке радиозонда с отечественными блоками датчиков. В рамках этой работы создать эталон относительной влажности, эталонные датчики влажности и температуры, разработать референтную методику измерений и провести сертификацию эталонного радиозонда.

На основе этих работ решить вопрос о возложении на ЦАО (как вариант – созданного Центра сертификации и испытаний), в пределах ее компетенции, прав и обязанностей по контролю и надзору, обязательному подтверждению соответствия, обязательной сертификации, государственного регулирования обеспечения единства измерений при осуществлении деятельности в области гидрометеорологии и смежных с ней областях так, как это сделано в Росатоме и Минобороны. Выполнение функций ЦАО позволит обеспечить применение на сети качественных средств измерений, что, в результате, повысит уровень своевременного обеспечения достоверными данными о состоянии тропосферы и стрatosферы.

Выполнение предложенных вариантов обеспечения соответствия качества аэрологических данных согласованным потребностям российских пользователей обеспечит повышение качества прогнозов погоды, снижение рисков ущерба экономике, здоровью граждан, обороне и безопасности государства.

Список литературы

1. Алдухов О. А., Баиров А. Н., Гордин В. А. Статистические характеристики прогностических метеорологических полей и их использование для объективного анализа // Метеорология и гидрология. 2002. № 10. С. 18–33.
2. Балауров А. М. Единство аэрологических измерений // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России : материалы II Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 5–7 июня 2019 г. С. 679–692.
3. Зайцева Н. А., Балауров А. М., Николаев А. В., Крестьянкова Н. Н. Современное состояние и перспективы развития радиозондирования в России // Метеорология и гидрология. 2021. № 9. С. 5–20.
4. Наставление по Интегрированной глобальной системе наблюдений ВМО. Дополнение VII к Техническому регламенту ВМО // ВМО. 2015. № 1160.
5. Руководство по климатологической практике // ВМО. 2014. № 100.

УДК 551.501.7

Определение фоновой засветки слабо замутненной атмосферы и ее влияние на точность определения прозрачности

А. П. Бобровский (kafedra_phys@rshu.ru), Н. В. Дьяченко (nat230209@yandex.ru), Е. Ю. Михеева (mikhteeva.elena@mail.ru), И. А. Потапова (potapovair@yandex.ru), А. Л. Скобликова (kafedra_phys@rshu.ru), П. П. Хлябич (khlyabich@mail.ru), Т. Ю. Яковлева (yakovtat@yandex.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Для без контактного исследования загрязнения воздушного бассейна используют оптические приборы. В частности, лидарное зондирование дает возможность детального исследования прозрачности атмосферы. Но в настоящий момент существует проблема воздействия фоновой засветки на точность определения прозрачности слабозамутненной атмосферы. Если не учитывать данную техническую особенность, то она может привести к существенным ошибкам при определении прозрачности атмосферы. В работе рассматривается анализ и решение данной проблемы. Предложен и проанализирован новый метод обработки лидарных данных, сформулированы алгоритмы определения фоновой засветки и коэффициента ослабления.

Ключевые слова: фоновая засветка, слабо замутненная атмосфера, коэффициент ослабления, приборная погрешность, трасса зондирования.

Введение

На данный момент человечество вступило в эру стремительной индустриализации. Выбросы в атмосферу вредных веществ усиливаются по всей поверхности планеты. С каждым днем все чаще говорится о новых угрозах, проблемах, последствиях и неутешительных прогнозах ученых экологов и других специалистов. Все эти факторы влияют на здоровье людей, плодородность земель, на воды океанов, морей и озер. Лидарное зондирование дает возможность детального исследования загрязнения атмосферы [12–15], однако в настоящий момент существует проблема воздействия фоновой засветки на точность определения прозрачности слабо замутненной атмосферы [1; 2].

В работе был проанализирован массив данных полученных LIDAR'ом во время эксперимента в Нью-Джерси. На рис. 1 в качестве примера представлен типовой сигнал из данного массива. Он представляет зависимость мощности эхосигнала от расстояния [3; 4; 7].

Методы и результаты

В начале, до испускания сигнала, регистрируется фоновая засветка, которая должна быть равна значению мощности, принимаемой в конце прохождения сигнала с высокой точностью. Однако из-за технических особенностей прибора, в момент испускания сигнала (см. рис. 1) происходит нарушение настроек аппаратуры, а это приводит к достаточно большой приборной погрешности, которую необходимо оценить, чтобы с помощью таких приборов можно было определять загрязнение слабо замутненной атмосферы [1; 2; 6].

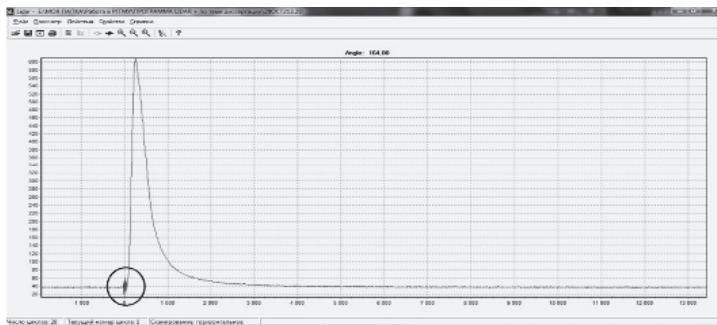


Рис. 1. Зависимость мощности эхосигнала от расстояния

В настоящее время существует метод оценки случайной погрешности фоновой засветки [8–11, 16]. Он заключается в осреднении параметра по трассе зондирования при анализе большого количества импульсов. Случайную ошибку P_* , от которой зависит эффективность метода, с учетом линеаризованного лидарного уравнения можно определить по формуле

$$\delta = \left\{ \frac{\sum_{ijk=1}^n (P_{ijk} - P_*)^2 \Delta_{ijk}^2}{\sum_{ijk=1}^n \Delta_{ijk}^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

где

$$\Delta_{i,j,k}^0 = \begin{vmatrix} P_i & 1/R_i^2 & 1/R_i \\ P_j & 1/R_j^2 & 1/R_j \\ P_k & 1/R_k^2 & 1/R_k \end{vmatrix},$$

$$\Delta_{i,j,k} = \begin{vmatrix} 1 & 1/R_i^2 & 1/R_i \\ 1 & 1/R_j^2 & 1/R_j \\ 1 & 1/R_k^2 & 1/R_k \end{vmatrix},$$

а

$$P_{ijk} = \Delta_{ijk}^0 / \Delta_{ijk}. \quad (2)$$

Формула (1) может быть записана следующим образом:

$$\delta = \sqrt{\left\{ \frac{D_1 - P_*^2}{D_0} \right\}} \quad (3)$$

Случайную ошибку осредненной величины P_* можно рассчитать в линейном приближении:

$$\delta = C_* \left\{ \sum_1^n \left(\frac{\partial P_*}{\partial P_1} \right)^2 P_i \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Причем

$$\delta P_i = C_* \sqrt[n]{P_i}. \quad (5)$$

Из формулы (4) следует:

$$\delta = \frac{C_*}{D_0} \left\{ \sum_1^n \left(\Delta_1 - \frac{\Delta_2}{R_i^2} + \frac{\Delta_3}{R_i} \right)^2 P_i \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

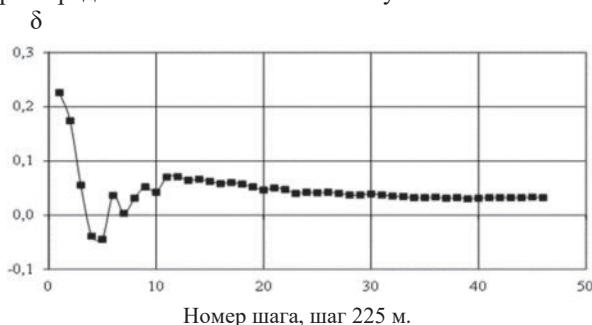
где

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} - \left(\sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \right)^2 \\ \Delta_2 &= \left(\sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \right)^2 - \sum_1^n \frac{1}{R_i} \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \\ \Delta_3 &= \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} - \sum_1^n \frac{1}{R_i} \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} \\ P_* &= \frac{\sum_{ijk=1}^n P_{*ijk} \Delta_{ijk}^2}{\sum_{ijk=1}^n \Delta_{ijk}^2} \end{aligned}$$

Случайную ошибку величины P_* можно рассчитать следующим образом:

$$\delta = C_* \left\{ \frac{\Delta_1}{D_0} \sum_1^n P_i \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Погрешность, полученная с использованием данного метода, существенно убывает с увеличением количества шагов зондирования. Особенно для средней величины P_* . На рис. 2 представлены результаты определения коэффициента ослабления при осреднении по 51 посылке импульсов.



Номер шага, шаг 225 м.

Рис. 2. Результаты определения коэффициента ослабления по 51 посылке импульсов

Однако в рассматриваемом массиве данных существует приборная погрешность, которая вносит ошибку, существенно ухудшающую определение загрязнения атмосферы.

Задача дополнительно усложняется при необходимости определить фоновую засветку для единичного сигнала. Для такого случая используют метод наименьших квадратов. При применении этого метода необходимо проанализировать квадрат разности левой и правой части лидарного уравнения [5; 17; 18], записанного для каждой характерной точки сигнала [19; 20],

$$P_i - P_* - \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) = 0, \quad (8)$$

$$\delta^2 = \sum_1^n \left(P_i - P_* - \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) = 0 \right)^2. \quad (9)$$

Результаты определения коэффициента ослабления по формуле (9) при посылке одного импульса представлен на рис. 3.

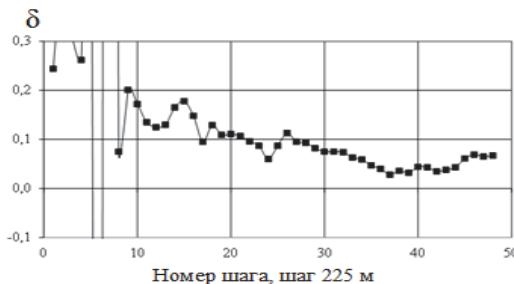


Рис. 3. Погрешность определения коэффициента ослабления при посылке одного импульса, $R(i=1) = 2500$ м

Анализ погрешности определения коэффициента ослабления, полученный при использовании уравнения (9) для одиночного импульса, показывает, что точность определения коэффициента ослабления рассматриваемым методом получается достаточно высокой для рассматриваемого случая. Такой метод может быть использован в тех случаях, когда повторное зондирование атмосферы происходит при существенном изменении окружающей среды.

Заключение

В работе проанализирован метод интерпретации аэрозольной информации, основанный на решении лидарного уравнения, содержащего фоновую засветку. Выполненные исследования позволили установить высокую эффективность метода решения линеаризованной обратной задачи лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы, осуществленного для одиночного импульса, а также показали необходимость определения фоновой засветки с высокой точностью. Результаты данной работы могут быть использованы для определения загрязнения атмосферы при ее слабом замутнении.

Список литературы

1. Алгоритм лидарного определения фоновой засветки и коэффициента ослабления слабо замутненной атмосферы без итерационного процесса / А. П. Бобровский, Н. В. Дьяченко, А. Д. Егоров, В. В. Косцов, Д. В. Калиничев, О. А. Кукин, Е. Ю. Михтеева, И. А. Потапова, А. Л. Скобликова, П. П. Хлябич, Т. Ю. Яковleva // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации : сб. тез. Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 58–60.
2. Влияние фоновой засветки на точность определения прозрачности слабо замутненной атмосферы / А. П. Бобровский, Н. В. Дьяченко, А. Д. Егоров, В. В. Косцов, Д. В. Калиничев, Е. Ю. Михтеева, И. А. Потапова, А. Л. Скобликова, П. П. Хлябич, Т. Ю. Яковleva // ИНФОГЕО-2019. Стратегическое управление развитием территорий : сб. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. 2019. С. 134–136.
3. Интерпретация слабого радиационного излучения при лидарном зондировании атмосферы / Н. В. Дьяченко, А. Д. Егоров, И. А. Потапова, А. Л. Скобликова, Н. А. Саноцкая, Т. Ю. Яковleva // Атмосферная радиация и динамика (МСАРД-2019) : сб. тез. Междунар. симп. СПб., 2019. С. 189–190.
4. Лидарное зондирование атмосферного аэрозоля / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсицкая, В. А. Драбенко // Метеорологический вестник. 2013. Т. 5, № 2. С. 42–51.
5. Егоров А. Д., Потапова И. А. Лидарные исследования прозрачности атмосферы // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Всейкова. 2004. № 553. С. 131–142.
6. Методы лидарного зондирования аэрозольных загрязнений атмосферы импульсами конечной длительности / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсицкая, А. А. Ошуркова // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 18. С. 48–56.
7. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсицкая Ю. Б. Обращение слабых сигналов обратного рассеяния// Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 22. С. 144–148.
8. Оценка погрешностей результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсицкая, Н. А. Саноцкая // Оptический журнал. 2013. Т. 80. № 3. С. 58–60.
9. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсицкая Ю. Б. Оценка случайных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик// Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 17. С. 51–55.
10. Систематические и случайные погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Д. В. Привалов, Ю. Б. Ржонсицкая // Депонированная рукопись № 1230-гм2005 16.12.2005
11. Егоров А. Д., Потапова И. А., Привалов Д. В. Систематические погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Всейкова. 2006. № 555. С. 30–34.
12. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсицкая Ю. Б. Обращение лидарных сигналов малой мощности// Оptический журнал. 2007. Т. 74. № 10. С. 25–28.
13. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсицкая Ю. Б., Саноцкая Н. А. Способ дистанционного оптического зондирования слабо рассеивающей атмосферы/ Патент на изобретение RU 2495452 C2, 10.10.2013. Заявка № 2011143951/28 от 31.10.2011.
14. Егоров А. Д., Потапова И. А. Способ определения прозрачности атмосферы/ Патент на изобретение RU 2439626 C2, 10.01.2012. Заявка № 2009144060/28 от 27.11.2009.
15. Способ оптического зондирования атмосферы / Егоров А. Д., Блакитная П. А., Потапова И. А., Ржонсицкая Ю. Б., Саноцкая Н. А. Патент на изобретение RU 2441261 C1, 27.01.2012. Заявка № 2010143286/28 от 22.10.2010.
16. Потапова И. А. Оценка инструментальных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик// Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2009. № 9. С. 86–91.
17. Модели процесса экстремального рассеяния света частицей атмосферного аэрозоля// Известия высших учебных заведений / И. А. Потапова, А. П. Бобровский, Н. В. Дьяченко, Ю. Б. Ржонсицкая, Н. А. Саноцкая, А. Л. Скобликова, Т. Ю. Яковлева // Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 376–383.
18. Egorov A. D., Potapova I. A., Shchukin G. G. Lidar methods for probing an atmospheric aerosol // Journal of Optical Technology. 2001. Vol. 68, N 11. P. 801–804.
19. Atmospheric aerosol measurements and reliability problem: new results / Yegorov A. D., Potapova I. A., Rzhonsnitskaya Yu. B., Sanotskaya N. A., Shchadlin A. V. // International Journal of Remote Sensing, 2014. V. 35. P. 5750–5765.
20. Method for solving the inverse problem of lidar sounding of a weakly turbid atmosphere / Potapova I. A., Bobrovsky A. P., Dyachenko N. V., Rzhonsnitskaya Yu. B., Sanotskaya N. A., Mikhteeva E. Yu., Khlyabich P. P., Kostsov V. V. // Journal of Instrument Engineering. 2021. Vol. 64, N 5. P. 384–391.

УДК 551.578.46+551.345

Изучение криолитозоны Зеравшанского и Гиссарского хребтов

В. Е. Гагарин, А. В. Кошурников, Д. М. Фролов (denisfrolovm@mail.ru),
Э. И. Додобоев, И. А. Набиев

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

Аннотация. Представлены краткие результаты изучение криолитозоны Зеравшанского и Гиссарского хребтов и описание численного метода для оценки глубины промерзания грунта на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха. Приведен пример использования этого численного метода оценки глубины промерзания для составления карты криолитозоны Зеравшанского и Гиссарского хребтов.

Ключевые слова: численный метод, глубина промерзания, толщина снежного покрова, температура воздуха, картографирование.

Объект исследования

Кафедрой Геокриологии МГУ в 2016 г. была организована стационарная геокриологическая площадка в районе Гиссарского хребта (перевал Анзоб, Зиддинская долина). На данной территории пробурены 3 геокриологические скважины глубиной от 3 до 5 м, оснащенными термодатчиками. Первые две скважины находятся на высоте 3372 м над у. м., третья скважина пробурена позже в 2019 г. в Зиддинской долине (абс. высота 2000 м). Нами были проведены режимные наблюдения за температурным состоянием грунтов, геофизические и лабораторные работы для определения состава, строения и свойств мерзлого грунта.

Методы исследования

Определение температурного режима мерзлых пород, лабораторные и геофизические методы (ВЭЗ, ЗСБ), дешифрирования спутниковых снимков.

Результаты исследований

По данным термометрических наблюдений сезонное промерзание грунтов на этой территории на склонах северной экспозиции наблюдается с середины октября, и продолжается до конца апреля. На отметке 1,5 м температура пород уже в конце мая меняется с отрицательной на положительную, а к началу июня происходит полное оттаивание пород. Учитывая снежный покров, состав пород и влажность, а также другие факторы, влияющие на глубину промерзания, было произведено моделирование глубины промерзания по разработанной расчетной схеме. Расчетное моделирование показало наличие сезонных мерзлых пород на склоне северной экспозиции и южной экспозиции перевала Анзоб на глубине до 1,5 и 1,2 м. В Зиддинской долине глубина сезонного промерзания не превышает 1 м. Расчет показал, что градиент среднегодовой температуры грунтов на каждые 100 м поднятия для Гиссарского хребта равно $0,37^{\circ}\text{C}$. Проведенные нами геофи-

зических исследования на перевале Анзоб позволили скорректировать геоэлектрический разрез, на котором по разнице в электрического сопротивления, хорошо выделяются суглинки, мощностью до 3 м, зона крупнообломочных пород с песчанистым заполнителем, зона скальных пород и зона разломов. В результате годовых исследований были построены карты-схемы распространения мерзлых пород Гиссарского хребта (рис. 1 и 2).

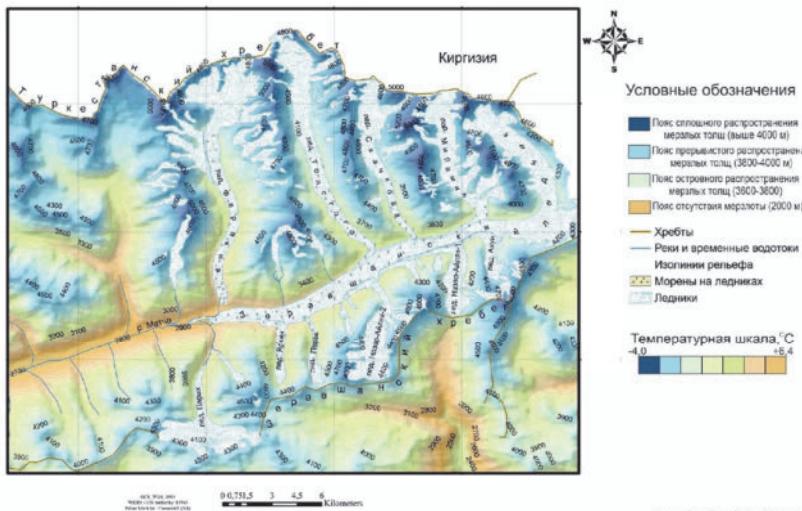


Рис. 1. Карта-схема криолитозоны в верховье р. Зеравшан (р. Матча)

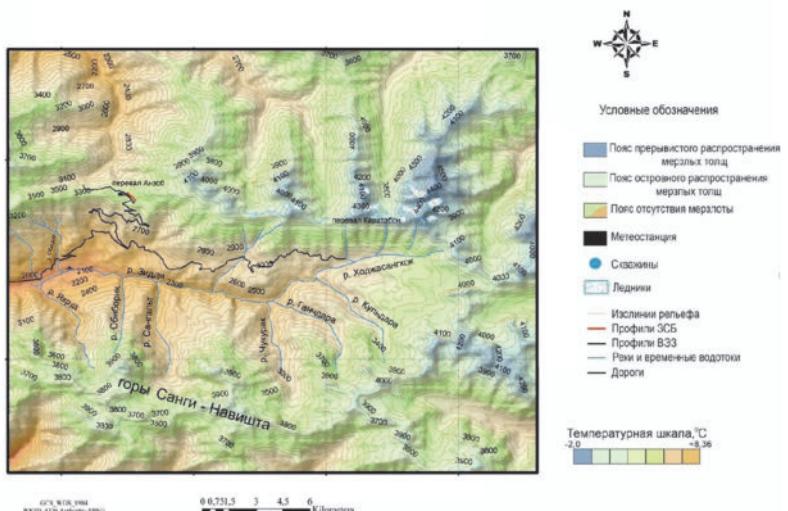


Рис. 2. Карта-схема криолитозоны в верховье р. Варзоб (р. Зидех)

Для составления карт использовался подход, при котором учитываются различия в высотном положении границ распространения ММП для макросклонов, имеющих наиболее выраженные различия геотермического режима. Таковыми являются макросклоны северной и южной экспозиции. Образцы, отобранные на перевале Анзоб, при искусственном замораживании в лабораторных условиях характеризуются массивной криогенной текстурой, распределение льда по всему объему грунта наблюдается в виде цемента. Образования ледяных шлиров наблюдается лишь при увеличении влажности до 30 %.

В данной работе на основе разработанной расчетной схемы также производится оценка глубины промерзания грунта для нескольких последних зимних сезонов на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха для перевала Анзоб (Таджикистан). Азиобский перевал (Таджикистан) находится на широте 39,07 и долготе 68,88 с высотой 3373 м над у. м. Среднегодовая температура там составляет $-2,7^{\circ}\text{C}$, но из-за сильного снегонакопления многолетнее промерзание отсутствует и наблюдается лишь сезонное. Расчетное моделирование показало наличие сезонных мерзлых пород на склоне северной экспозиции на глубине до 1,5 м. Так, в зимний период 2018 г. на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания грунта составила 1,5 м (рис. 4). В зимний период 2020 г. на склонах северной экспозиции глубина сезонного промерзания грунта составила 1,2 м при среднегодовой температуре грунтов $2,42^{\circ}\text{C}$ (рис. 5). Расчеты изменения глубины промерзания грунта производились по предложенной расчетной схеме по данным о толщине снежного покрова и температуре воздуха на основании трехслойной модели среды (талый грунт, мерзлый грунт, снег) и при предположении линейного изменения температуры в средах и тепловому потоку согласно закону Фурье.

Также были рассмотрены располагаемые в открытом доступе на сайте «Погода и климат» архивные метеорологические данные по метеостанции «Азиобский перевал». И уже на основе выбранных из них данных по температуре воздуха и толщине снежного покрова за зимние сезоны 2010/11–2019/20 (рис. 3) были произведены расчеты влияния толщины снежного покрова и температуры воздуха на глубину промерзания грунта по предложенной расчетной схеме.

Расчетная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе мерзлого и талого грунта. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии снежного покрова через него в атмосферу. Поток тепла рассчитывался по закону Фурье, как произведение теплопроводности и градиента температуры. Предполагалось, что температура в каждой из сред изменяется линейно (например, [4]). Для снежного покрова и мерзлого грунта использовалась формула теплопроводности двухслойной среды.

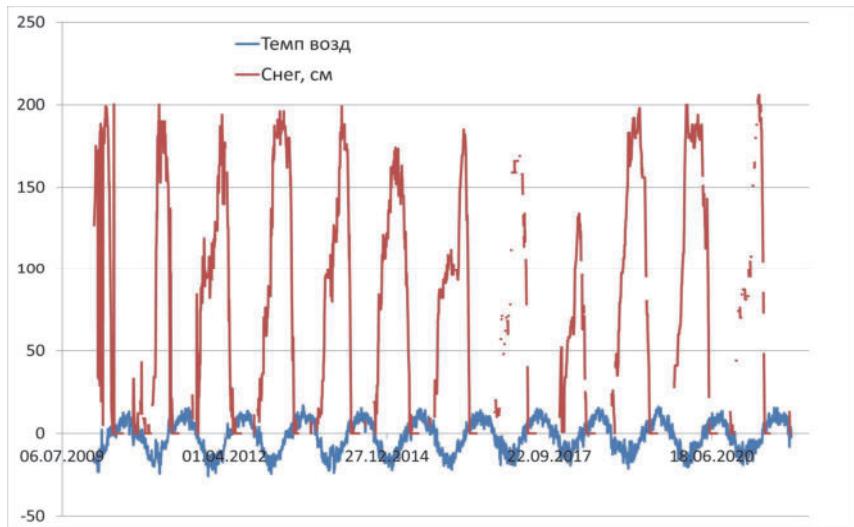


Рис. 3. Изменения температуры воздуха и толщины снежного покрова по архивным данным метеонаблюдений для метеостанции «Анзобский перевал» для зимних периодов 2010/11–2019/20

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

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

$$dh_{mz} / d\tau = V = (F_1 - F_2) / cL, \quad (1)$$

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

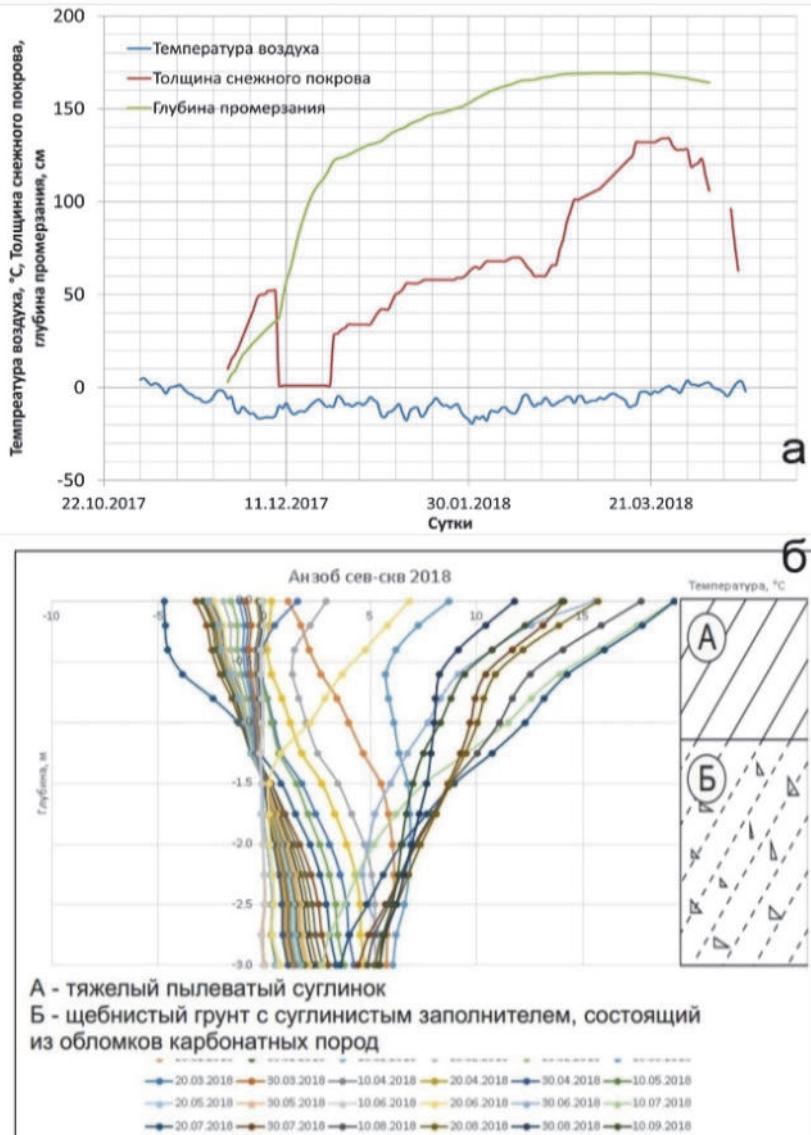


Рис. 4. Изменения температуры воздуха, толщины снежного покрова и глубины промерзания грунта по данным расчетов и наблюдений для метеостанции Анзобский перевал для зимнего периода 2017/18

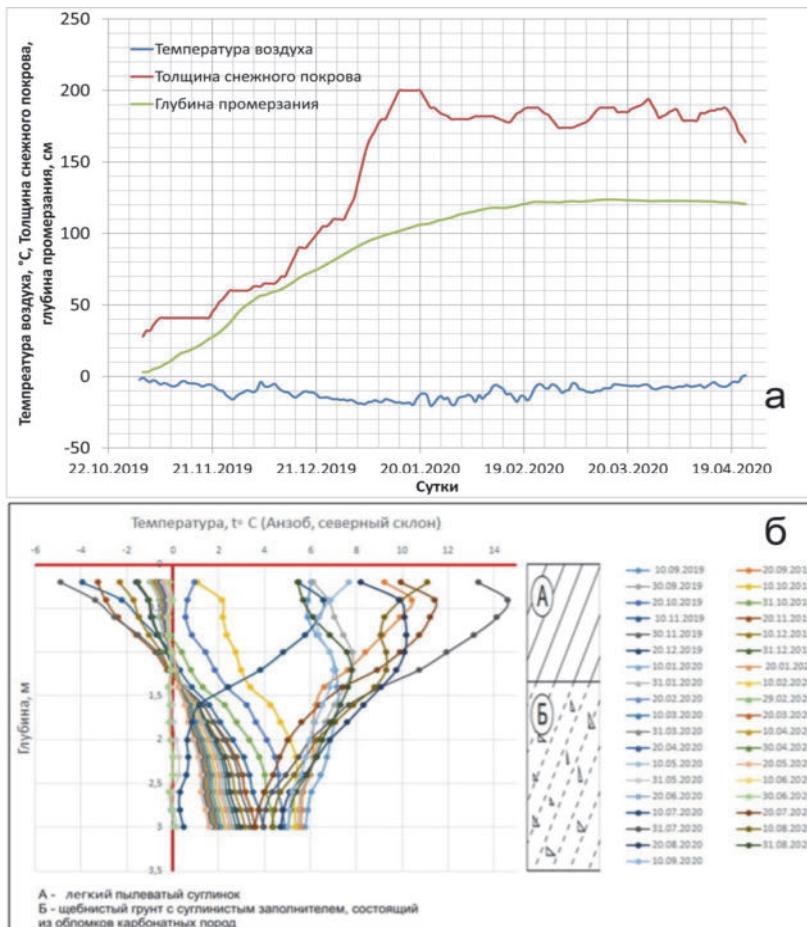


Рис. 5. Изменения температуры воздуха, толщины снежного покрова и глубины промерзания грунта по данным расчетов и наблюдений для метеостанции Анзобский перевал для зимнего периода 2019/20

Тепловой поток выражался по закону Фурье: $F = -\lambda \text{ grad}T$. Тепловой поток через замерзший грунт от фронта промерзания в атмосферу в случае наличия снежного покрова выражался через теплопроводность и тепловой поток комбинации из двух сред (снежный покров и мерзлый грунт) согласно данным справочника [2] как:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = -\frac{\Delta T}{\frac{\Delta x_c}{\lambda_c} + \frac{\Delta x_{M2}}{\lambda_{M2}}} = \frac{-T_{\text{возд}}}{\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_{M2}}{\lambda_{M2}}}, \quad (2)$$

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

Предполагалось, что на глубине 10 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со среднегодовым значением около $2,42^{\circ}\text{C}$. Поэтому

$$F_2 = -\lambda_{\text{мг}} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{\text{мг}} \frac{T_0}{10 - h_{\text{мг}}}, \quad (3)$$

Здесь $\lambda_{\text{мг}}$ – теплопроводность талого грунта. Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлого грунта $h_{\text{мг}}$ равнялась 0,5 см. На каждом шаге по времени (каждый день) вычислялась (рассчитывалась) скорость промерзания V и значение толщины мерзлого грунта $h_{\text{мг}}$ для следующего дня (шага по времени). Согласно [1], средняя теплопроводность талого и мерзлого глинистого грунта могла быть взята как 1,4 и $1,8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$. Средняя теплопроводность снега λ_c рассчитывалась относительно плотности по формуле А. В. Павлова [3] и бралась равной $0,18 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$. В работе для выведенного дифференциального уравнения по времени первого порядка для изменения глубины промерзания грунта была построена разностная схема посредством аппроксимации этого дифференциального уравнения явным методом Эйлера: $h_{\text{мг}}(t_{n+1}) = h_{\text{мг}}(t_n) + \Delta t V(t_n)$.

По полученной разностной схеме для каждого зимнего сезона 2010/11–2019/20 были произведены расчеты изменения глубины промерзания грунта. Примеры результатов расчета для зимних сезонов 2017/18 и 2018/2020 приведены на рис. 4 и 5.

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

Согласно расчетам, грунт под снежным покровом остается мерзлым на Анзобском перевале с декабря по апрель. Мощность накапливаемого снежного покрова может достигать при этом полутора метров и более. При этом грунт под покрытой снежным покровом поверхностью промерзает согласно расчетам в среднем на 1,5 м. Таким образом, предложенный метод расчета динамики глубины промерзания грунта на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова позволяет оценить промерзание грунта как фактора устойчивости грунта при строительстве селе- и лавинозащитных сооружений.

Выводы

Перевал Анзоб относится к области сезонного промерзания пород, учитывая градиент среднегодовой температуры пород можно заключить, что появление многолетнемерзлых пород на Гиссарском хребте мы можем ожидать на высотах более 4 тыс. м.

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

Список литературы

1. Грунтоведение / под ред. В. Т. Трофимова. М. : Изд-во МГУ : Наука, 2005, 1024 с.
2. Мухеев М. А., Мухеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. М. : Энергия, 1977, 344 с.
3. Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.
4. DeGaetano, A. T., Cameron M. D., Wilks D. S. Physical simulation of maximum seasonal soil freezing depth in the united states using routine weather observation // Journal of Applied Meteorology. 2001. Vol. 40, N 3. P. 546–555.

УДК 551.345

Концепция и первые результаты проекта создания государственной системы мониторинга многолетней мерзлоты РФ на базе наблюдательной сети Росгидромета

Н. Э. Демидов (nikdemidov@mail.ru), С. Р. Веркулич, М. А. Анисимов,
Ю. В. Угрюмов

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

Аннотация. Деградация многолетней мерзлоты – одно из очевидных негативных последствий теплеющего климата. В целях контроля реакции мерзлоты на климатические изменения в РФ планируется создание государственной системы мониторинга состояния многолетней мерзлоты с опорой на метеостанции Росгидромета. Метеостанции покрывают территорию криолитозоны, логистически доступны и, что особенно важно, обеспечены длительными рядами климатических наблюдений (в том числе, наблюдениями за температурой грунтов до глубины 3,2 м). Программой формирования сети мониторинга, разработанной в ФГБУ “АНИИ”, предусматривается создание 140 пунктов с термометрическими скважинами и площадками наблюдения за сезонно-тальным слоем. Рабочая документация наблюдений на пунктах мониторинга основана на российских ГОСТ и требованиях международной программы мониторинга мерзлоты GTNP. В 2022 г. начаты работы по выбору точек для организации пунктов, которые охватили север европейской части России, Западную и Южную Сибирь. В 2023 г. предполагается ввод в эксплуатацию первых тридцати пунктов мониторинга. В 2024–2025 гг. планируется организация еще 110 пунктов в пределах оставшейся части криолитозоны.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, криолитозона, фоновый мониторинг.

3 сентября 2021 г. Президент РФ утвердил перечень поручений Правительству РФ, среди которых (Пр-1971, п. 1.в) «обеспечить внесение в законодательство Российской Федерации изменений, направленных на создание на базе государственной наблюдательной сети Росгидромета государственной системы мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ГСМ СММ), наделить Росгидромет необходимыми полномочиями, и предусмотреть выделение из федерального бюджета бюджетных ассигнований на разработку и функционирование ГСМ СММ при подготовке проекта федерального закона о федеральном бюджете на 2023 год и на плановый период 2024 и 2025 годов».

В проекте Росгидромета ГСМ СММ представляет собой структурно-организованные, пространственно-распределенные, унифицированные наблюдения за температурным режимом (в скважинах) и динамикой сезонно-talого слоя (СТС) многолетней мерзлоты, сбор, накопление, обработку и анализ информации для оценки состояния мерзлоты, прогноза ее изменения под влиянием климатических флюктуаций и антропогенного воздействия. Концептуально, базовым элементом ГСМ СММ является распределенная по территории развития мерзлоты сеть из 140 пунктов наблюдений за состоянием многолетней мерзлоты (ПНСММ), сопряженных со станциями и обсерваториями Росгидромета. На всех пунктах будут выполняться непрерывные автоматические измерения температуры многолетней мерзлоты (4 срока через каждые 6 ч) в скважинах глубиной 25,2 м на 22 горизонтах; на ключевых пунктах (около 30) будут также вестись наблюдения за динамикой СТС. Создание ПНСММ проводится в соответствии с отечественными нормативными документами, а также с основными требованиями международных программ TSP и CALM, входящих в международную программу мониторинга мерзлоты GTNP. Данные с ПНСММ будут передаваться для обработки, архивации и анализа в организуемый в ФГБУ «ААНИИ» Центр мониторинга состояния многолетней мерзлоты (ЦМСММ). Данные и их интерпретации будут представляться в органы государственной власти, в заинтересованные учреждения и международные центры в рамках участия России в международных программах.

Для обеспечения начала создания с 2023 г. ГСМ СММ, в 2022 г. в ФГБУ «ААНИИ» выполнялся комплекс подготовительных научно-технических мероприятий, в том числе часть работ выполнена в рамках реализации Важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», который включил создание ГСМ СММ в свои задачи 2022–2024 гг.

В ходе этих работ были обоснованы и ранжированы научно-технические критерии и регламент выбора станций Росгидромета для создания ПНСММ. Критерии нацелены на обеспечение репрезентативности как всей сети ПНСММ (сравнительно равномерное распределение пунктов по территории криолитозоны России, присутствие пунктов в основных геокриологических зонах, климатических поясах и областях, физико-географических странах и областях и т. д.), так и каждого ПНСММ в отдельности (наличие длительного ряда наблюдений за температурой воздуха и грунта на глубине до 3,2 м, наиболее типичный для района рельеф и расположительность, отсутствие значительного антропогенного воздействия и др.).

В соответствии с ранжированными критериями, на основе анализа дистанционных, литературных материалов и открытых информационных систем был составлен предварительный перечень 180 станций Росгидромета, перспективных для создания сопряженных с ними ПНСММ (рис. 1). Превышение запланированного числа пунктов (180 вместо 140) связано с тем, что часть пунктов после проведения полевого обследования станций и их окрестностей могут быть признаны непригодными для размещения ПНСММ.



Рис. 1. Распределение 180 станций Росгидромета, перспективных для создания ПНСММ в 2023–2025 гг.

В результате полевых работ 2022 г. на 47 станциях Северного, Обь-Иртышского, Среднесибирского, Иркутского, Забайкальского, Западно-Сибирского и Дальневосточного УГМС Росгидромета было определено (в соответствии с ранжированными критериями, с выполнением геофизических исследований, с исследованием почвенно-грунтовых разрезов и т. д.) местоположение 33 ПНСММ с термометрическими скважинами, из которых 8 ПНСММ подходят также для заложения площадок наблюдений за динамикой СТС (рис. 2). Тридцать из этих пунктов намечены для обустройства в первой очереди реализации проекта ГСМ СММ в 2023 г. – бурение и оснащение термометрических скважин, заложение площадок наблюдений за динамикой СТС.

С целью тестирование технологий, оборудования и приборов для получения и передачи данных наблюдений за температурным режимом многолетнемерзлых грунтов на ПНСММ, в 2022 г. на архипелаге Шпицберген было выполнено экспериментальное бурение и оснащение опытной термометрической скважины, автоматическая передача данных с которой в ФГБУ «ААНИИ» продолжается уже несколько месяцев.

Важной составляющей 2022 г. была подготовка методических документов организации и осуществлению мониторинга состояния многолетней мерзлоты, в частности «Руководства по организации и осуществлению государственного мониторинга состояния многолетней мерзлоты на государственной наблюдательной сети». Этот документ проходит в настоящее время экспертизу в многочисленных организациях Росгидромета. Подготовлены также проекты Паспорта пункта наблюдений за состоянием многолетней мерзлоты, Положения о Центре мониторинга состояния многолетней мерзлоты.



Рис. 2. Результаты полевых работ по выбору станций Росгидромета для создания ПНСММ в 2023 г. (ТС – термометрическая скважина, СТС – площадка наблюдений за динамикой СТС)

Для обеспечения стабильного приема, архивации, обработки и использования данных наблюдений с ПНСММ в 2022 г. начались разработки проектных решений по серверному комплексу приема и обработки данных ГСМ СММ, базе данных ГСМ СММ в ФГБУ «АНИИ».

УДК 551.510.42

К вопросу о распределении стока в устьевых системах псевдodelт западного побережья озера Байкал

Е. А. Ильчева (*lenail3663@mail.ru*)^{1,2}, М. В. Павлов
(*maksimpavlov_v@mail.ru*)¹, А. А. Ушкалов (*lolitamen@mail.ru*)^{1,2}, С. Р. Чалов
(*hydroserg@mail.ru*)³, В. М. Морейдо (*moreido@mail.ru*)^{3,4}, Д. В. Кобылкин
(*agrembrandt@inbox.ru*)¹

¹Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, Иркутск

²Иркутский государственный университет, Иркутск

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

⁴Институт водных проблем РАН, Москва

Аннотация Работа посвящена оценке распределения стока в устьевых системах малых и средних рек, впадающих в южную котловину оз. Байкал. Впервые рассматривается вопрос о балансовой невязке стока между вершиной и рукавами разветвленных устьевых систем, резаных в полигенетические конусы выноса, образующие современные псевдodelты рек Сармы и Голоустной. Данные получены традиционными приборами и методами, также были использованы современные автоматизированные системы сбора данных об уровне, стоке и температуре воды. Проведены мониторинговые комплексные гидролого-геоморфологические исследования, на основе которых сделаны научно обоснованные выводы о возможности фильтрации и прохождения доли стока по толще рыхлых отложений селевых конусов. На основе полученных предварительных оценок распределения стока по русловой сети выявлена необходимость более детальной съемки для расчета подрусловой составляющей, что в свою очередь, может определить новые задачи для уточнения притока с водосборов средних и малых рек в котловину оз. Байкал.

Ключевые слова: устьевая система, Байкал, псевдodelты, распределение стока.

Введение

Многочисленные реки, речки, ручьи и пади, доставляющие свои воды в Байкал, при впадении в озеро и во взаимодействии с ним создают разнообразные морфогенетические типы устьевых систем (УС). Вопросам типизации, особенно в отечественной науке, определено важное место в комплексе гидролого-геоморфологических исследований устьевых процессов [2; 3; 7; 8]. В зарубежной научной среде устье обычно называется эстуарием, реже – дельтой. В гидролого-морфологической типизации устьевых областей В. Н. Михайлова [7] проведено выделение их основных типов: простые, эстuarные, эстuarно-дельтовые, дельтово-эстарные и, наконец – дельтовые. Важно отметить, что классические типизации не учитывают уникальность природных геосистем Байкальской рифтовой зоны. Согласно гидролого-геоморфологической и морфогенетической типизации устьевых систем областей притоков Байкала выделяются следующие типы: 1) дельтовая система с дельтой выдвижения; 2) эстuarно-дельтовые системы; 3) эстуарии; 4) простые устья с аккумулятивным выступом и приустьевым расширением; 5) многорукавные устья. На наш взгляд, необходимо дополнить эти типизации

разновидностями устьев с учетом особенностей строения байкальских побережий. К примеру, на западном побережье Байкала устьевые области весьма часто представлены селевыми (пролювиальными) конусами выноса, по поверхности которых распластывается сток в современной устьевой, часто разветвленной веерообразной русловой сети (р. Риты и др.). Предлагается выделять многорукавные устья, развитые на полигенетических конусах выноса в отдельный байкальский тип – псевдodelты, например устья рек Голоустная, Сарма, Тыя и др. Псевдodelты имеют схожие с дельтами выдвижения признаки: разветвленная устьевая русловая сеть, выдвинутость озерного края за генеральную береговую линию, с системой абразионно-аккумулятивных блокирующих кос и баров. Основное их отличие заключается от выдвинутых дельт в том, что межрукавные пространства созданы неаллювиальными фациями и современная русловая система врезана в ранее сформированные полигенетические конусы выноса [9]. Особый интерес представляет ранее неизученный вопрос распределения стока в байкальских псевдodelтах как гидрологический фактор формирования УС.

Материалы и методы

Реки Сарма и Голоустная берут начало на северо-западных склонах северо-глыбового поднятия Приморского хребта. Средняя высота водосбора для р. Сармы 1064 м н. у. м. и 818 м н. у. м. для р. Голоустной, при максимальных высотах – 1729 м и 1164 м соответственно, основные морфоструктурные параметры бассейнов представлены в табл. 1. Согласно классификации речных систем Восточной Сибири, рассматриваемые реки по их величине относятся к малым и средним [4]. Долины рек занимают малые межгорные впадины, заполненные аллювиальными плейстоцен-голоценовыми рыхлыми отложениями. На бортах долины р. Голоустной вскрываются пачки песчано-гравелистых флювиальных отложений, к настоящему времени возраст этих отложений не установлен и может относиться к неогену.

Таблица 1
Основные гидроморфометрические характеристики бассейнов речных систем

Параметр	Речная система	Голоустная	Сарма
Площадь водосбора, км ²	2284	770	
Средняя высота водосбора, м н. у. м.	779	959	
Максимальная высота водосбора, м н. у. м	1164	1729	
Суммарная длина водно-эрэзионной сети, км	1536	493	
Средний уклон водосбора, °	8,5	19,5	
Уклон водной поверхности, °	4,19	10,4	
Коэффициент эрозионного расчленения, км/км ²	0,67	0,64	
Порядок речной системы по Хортону-Стралеру	5	5	
Среднемноголетний расход воды в устье, м ³ /с*	9,6	5,35	
Максимально наблюденный расход воды в устье, м ³ /с*	308	54,8	
Площадь УС, км ²	7,8	7,4	

* – данные Росгидромета [10].

Река Голоустная образуется слиянием Большой и Малой Голоустной. Верховья реки весьма близко (5 км) расположены к берегу Байкала, соприкасаясь с верховьями р. Харгино. Длина 122 км, площадь водосбора 2,28 тыс. км², средний уклон водосбора 8,5°, средний уклон водной поверхности 3,6°. Среднегодовой расход воды в 3,5 км от устья составляет 9,6 м³/с, годовой объем стока – 0,26 км³. Ширина реки в районе пос. Большое Голоустное – 55 м, глубина – 2 м. В низовьях долина заболочена.

Река Сарма берет начало в районе горы Голец Трехголовый. В гидрологическом режиме выделяются половодье и паводки. Зимняя межень характеризуется крайне низким стоком или полным его отсутствием к февралю – началу марта. Длина – 66 км, площадь водосбора – 770 км², средний уклон водосбора – 19,5°, средний уклон водной поверхности – 10,4°.

Устьевые области рассматриваемых рек сформированы пролювиально-аллювиальными конусами выноса в начале голоцена [5; 6] и прорезаются современной русловой сетью. В разные периоды водности р. Голоустная впадает в Байкал несколькими протоками от 3 до 6, а у р. Сармы три рукава и искусственно созданный канал впадают в зал. Хужир-Нуга. На отмелом взморье (менее 1,3°) у рассматриваемых УС формируется фитогенный берег, выдвигающийся в акваторию. Галечные косы блокируют лагуны, побережья местами заболоченные. Периферийная часть подвержена затоплениям и подтоплениям при подъеме уровня озера, породы не устойчивы к абразии. Скорость абразии достигает до 0,2 м/год с учетом компенсации наносов. Основная часть стока воды проходит в теплую часть года, для которого характерна активная циклоническая деятельность с интенсивными многодневными дождями, в результате чего возникают паводки с повышенной водностью (60–70 %).

Гидрометрические исследования для научного обоснования распределения стока по гидрографической сети устьевых областей Сармы и Голоустной начаты с заложения реперов на основных протоках и в вершинах УС в 2013 г. и 2020 г. соответственно (рис. 1). Реперы установлены на высоких поймах и берегоукрепительных дамбах, забетонированы и привязаны к абсолютным отметкам и географическим координатам. Для получения абсолютных отметок реперов проведена RTK-съемка (Real-Time Kinematic Survey). Данный подход позволяет проводить мониторинговые морфометрические работы и провести сравнительный анализ динамики уровней воды и русловых горизонтальных и вертикальных деформаций.

На морфостворах выполнялись гидрометрические работы классическими методами: измерялись ширина и глубины русла, скорости потока на вертикалях, описывался характер донных отложений, и отбирались пробы воды на гидрохимический анализ и расчет стока взвешенных наносов. Уровень поверхностных вод привязывался нивелирной съемкой к отметкам репера. Для устьевой области р. Сармы проведены измерения уровня грунтовых вод в скважине и канале, сохранившихся со времени функционирования рыбозаводного завода. Работы на морфостворах проводятся в различные фазы водного режима с разной периодичностью.

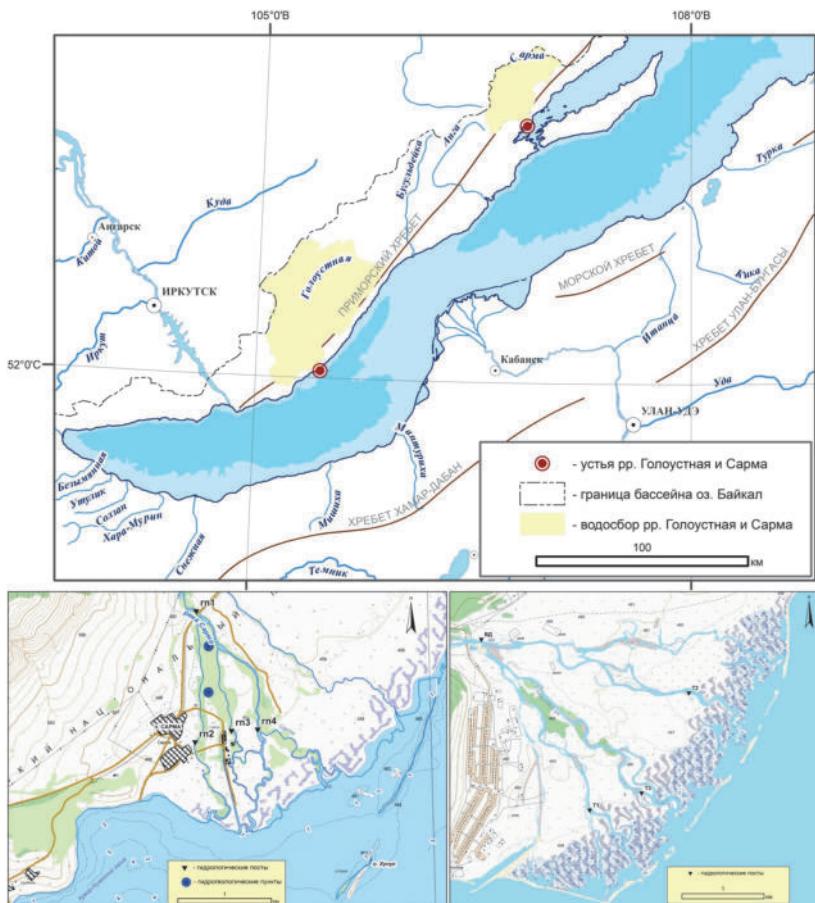


Рис. 1. Положение исследуемых водосборов (верх) и размещение створов мониторинговой сети в устьевых областях Сармы и Голоустной (низ)

Весной 2022 г в рукавах УС рек установлены логгеры, для получения данных об уровнях и температуре воды. В первичные данные об уровнях внесена барометрическая поправка, позволяющая с большей точностью построить график связи уровня и расходов воды.

Для получения информации о скоростях деформации русел и площасти устьевых областей проведен сравнительно-морфометрический анализ разновременных картографических материалов и данных ДЗЗ. Начиная с 2016 г. для исследуемых устьев проводятся съемки БПЛА с возможностью геопозиционирования снимков. По результатам съемок созданы оротофотопланы, по которым получены морфодинамические параметры УС, включая плановые миграции русел,

русловых мезоформ, других элементов гидрографической сети и границы озерного края, а также отдельных форм прибрежного рельефа и участки заболоченных и подтопленных территорий.

Результаты

Для оценки условий стокоформирования проведен анализ структурно-гидрографических характеристик речных систем (РС) по порядковой бонитировке [1], представленный в табл. 2.

Таблица 2

Структурно-гидрографические характеристики по порядкам речных систем

Порядок РС	Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м	Максимальная высота водосбора, м	Уклон водосбора, °	Уклон водной поверхности, °	Суммарная длина, км	Коэффициент эрозионного расчленения, км/км ²	Магнитуда	Средняя длина, км	Средняя площадь водосбора, км ²	Частота потоков, шт/100 км ²
Голоустная											
1	1240	865	1164	7,45	5,77	770	0,62	593	1,30	2,09	48
2	530	826	1157	8,3	6,02	340	0,64	133	2,56	3,98	25
3	217	802	1117	8,89	4,3	166	0,76	30	5,53	7,23	14
4	167	751	1034	8,65	2,9	115	0,69	9	12,78	18,56	5
5	113	651	1048	9,33	1,96	85,8	0,76	1	85,80	113,00	1
Сарма											
1	442	1122	1729	14,24	11,22	241	0,55	216	1,12	2,05	49
2	139	1034	1581	15,12	10,44	120	0,86	46	2,61	3,02	33
3	107	967	1425	17,27	10,43	73,6	0,69	12	6,13	8,92	11
4	50,9	897	1188	19,25	8,75	36,8	0,72	2	18,4	25,45	4
5	30,6	774	1154	31,62	11,38	21,3	0,70	1	21,3	30,60	1

Плотность (частота) потоков и коэффициенты эрозионного расчленения рельефа сопоставимы, что отражает сходные условия формирования, аккумуляции и трансформации поверхностного стока. Несмотря на различия в размерах и уклонах бассейнов, количество водотоков 1-го порядка (магнитуда) при входе в вершины устьевых областей формируется среднемноголетний сток сопоставимых величин до 10 м³/с. Количество водотоков 1-го порядка отличается более чем в два раза, что, в свою очередь, выражается почти в шестикратном превышении максимально наблюденного стока в р. Голоустной. Это различие объясняет более частые и высокие паводки. Распределение стока в русловой сети за период наблюдений для устьевой области р. Сармы представлено в табл. 3 и на рис. 2.

Расходы в вершине УС существенно изменились в различные фазы гидрологического режима от 2,8 в период осенней межени до 27 м³/с в половодье. Общая тенденция распределения стока показывает высокую долю левого рукава, от 14 в осеннюю межень 2022 г. до 79 % на спаде половодья 2022 и 2014 гг. Максимальный сток наблюдался в июне 2014, 2022 гг., при величине 6,7 м³/с и уровень воды в реке достигал бровок русла. При более высоких уровнях воды происходит

сток по пойме, УВВ может достигать 1–1,5 м. Центральный и правый рукава пропускают не более 20 %, расходы значительно меньше 0,1–0,7 м³/с. Обращает на себя внимание постоянная невязка в балансе стока от вершины к рукавам, составляющая от 7,8–83,7 %. Предположительно потери речного стока компенсируются фильтрацией в теле конуса и последующим подрусловым стоком в Байкал. Искусственный канал дренирует межрукавное пространство в центральной части конуса, доля стока по каналу может достигать 14 % с дебитом до 0,64 м³/с.

Распределение стока по русловой системе р. Сарма

Таблица 3

Створ	Июнь 2014	%	Июнь 2015	%	Май 2015	%	Ок- тябрь 2015	%	Май 2016	%	Июнь 2022	%	Сен- тябрь 2022	%
ВД	27		10,3	100	6,1	100	2,8	100	10,46	100	8,5	100	13,2	100
ГП2	2,09	7,8	2,1	20,4	0,5	7,9	0,1	3,6	1,54	14,7	0,1	1,1	0,1	0,8
ГП3	0,71	2,6	0,7	6,8	0,3	4,8	0,5	17,7	0,64	6,1	0,1	0,8	0,2	1,6
ГП4	6,70	24,8	6,1	59,2	2,0	32,6	1,1	39,7	4,17	39,9	6,7	79,7	1,8	13,8
Канал	0,64	2,4	0,6	5,8	0,3	4,9	0,4	14,4	0,00	0,03	0,0	0,1	0,01	0,1
Невязка	16,87	62,5	0,8	7,8	3,0	49,8	0,7	24,5	4,11	39,3	1,6	18,4	11,1	83,7

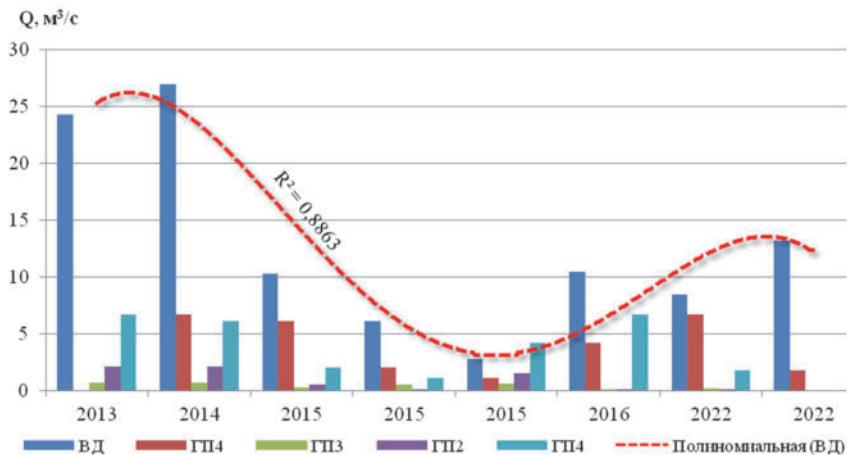


Рис. 2. Сток в УС р. Сарма за период экспериментальных наблюдений

Гидрометрическая съемка проводилась единожды в зимнюю межень 2022 г. (февраль – март). В зимнее время сток наблюдался только в основном русле, т. е. в главном узле бифуркации, магистральные рукава были проморожены, в руслах с большей долей стока (в теплые сезоны) развивались обширные наледи. Вероятно, сток осуществлялся в толщах конусов выноса. Мощность наледного льда достигала 1,5–2,2 м, при вскрытии через лунки речные воды изливались на поверхность льда с напором в течение 10–12 ч.

Наблюдения за стоком в УС р. Голоустной проводились в период открытия русла в 2016, 2020 и 2022 гг. (табл. 4).

Таблица 4

Распределение стока УС р. Голоустная

Створ	06.2016		06.2020		06.2022		08.2022	
	Q , м ³ /с	%						
ВД	7	100	7,75	100	7,22	100	5,01	100
T1 (правый)	2,6	37,1	0,91	11,7	1,21	16,8	0,94	18,8
T2 (левый)	2,4	34,3	1,82	23,5	1,03	14,3	0,86	17,2
T3 (центральный)	нб	-	1,56	20,1	1,43	19,8	1,45	29
Невязка	2	28,6	3,46	44,6	3,55	49,2	1,75	34,9

В исследуемый период русловая сеть устья представлена тремя рукавами, за исключением 2016 г., когда сток осуществлялся по окраинным рукавам. На некоторых топографических картах (1986–95 гг.) отображено до 5 рабочих русел, в маловодный период с 2000-х по 2017 г. в основном действовали 3 протоки, а остальная сеть была выражена в рельфе и индицировалась по влаголюбивой растительности. За период экспериментальных наблюдений сток в июне и августе составлял от 5 до 7,8 м³/с, и относительно равномерно распределялся по русловой системе.

Невязка варьирует от 28 до 50 %, и по аналогии с разветвленной УС р. Сармы, можно предположить, что потери поверхностного стока обусловлены фильтрацией в отложениях конуса выноса и разгрузка грунтовых вод происходит (высасывается) в пределах периферийной заболоченной зоны. Озерный край представлен лагунно-лиманным комплексом, заболоченными участками и «разбросанными руслами».

В 2022 г. начаты мониторинговые наблюдения на установленных в руслах пяти логгеров давления и температуры воды. Для приведения значений давления с логгеров в ход уровней воды были использованы срочные данные наблюдений за атмосферным давлением на метеостанции Хужир [10]. Ход уровней на Сарме и Голоустной за совместный период с 28 июня по 21 августа лишь частично согласуется друг с другом (рис. 3).

Из значимых паводков совместно прослеживается только наиболее крупный, проходивший с 19 по 30 июля. В это время на графиках виден согласованный подъем и спад. На УС р. Сармы период наблюдений более продолжительный и спад прослеживается на одном логгере до конца ряда, тогда как на двух других наблюдается обратный подъем с 12 сентября. При этом анализ корреляционных связей между уровнями воды на постах, установленных на двух реках, показывает значимые корреляции, как в пределах каждой из УС, так и между ними. В УС р. Голоустной коэффициент корреляции равен 0,92 ($n = 1306$); в пределах УС р. Сармы – от 0,92 до 0,98 ($n = 469$). Наиболее высокая корреляционная связь между УС прослеживается по логгерам Сарма 888 и Голоустная 3 ($R = 0,7$, $n = 1306$), очевидно благодаря согласованному подъему именно в период паводка. Этот же подъем четко прослеживается и в данных с других логгеров, однако несогласованность колебаний уровня в другие периоды снижает коэффициент корреляции. Тем не менее, он в трех случаях составляет более 0,5, что говорит о наличии сходных механизмов формирования паводочного стока в двух бассейнах.

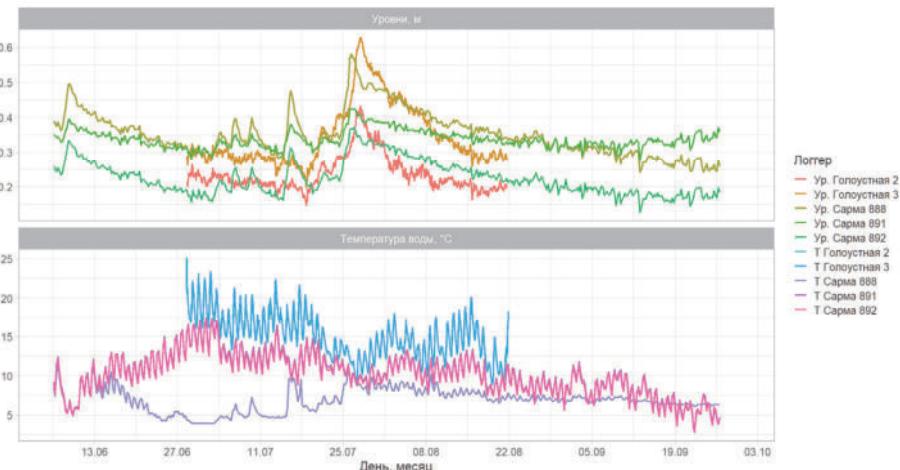


Рис. 3. Ход уровней (вверху) и температур (внизу) воды на логгерах в УС рек Сармы и Голоустной

Совместный анализ колебания уровней и температуры воды на логгерах показал неожиданные результаты. Колебания температуры на логгерере Сарма 888 не согласуются с двумя другими логгерами на этой же реке. Измеренная температура начиная с 13 июня становится существенно ниже, и вплоть до 26 июля не превышает 10°C, затем повышается обратно, но не достигает значений других логгеров. При этом суточные колебания также существенно меньше, чем на двух других логгерах. Данные по температуре с логгером Сарма 888 хорошо согласуются с уровнями воды на всех логгерах, включая установленные на Голоустной ($R = 0,4\text{--}0,88$), что противоречит данным с других логгеров, где между температурой и уровнями наблюдается устойчивая отрицательная связь ($R = -0,5\text{...}-0,6$ для Сармы и $R = -0,27\text{...}-0,5$ для Голоустной). Температура воды в УС Сармы в среднем на 5°C ниже, чем на Голоустной, при этом на логгерере Сарма 888 она еще ниже – 6,9 °C. Температурная аномалия, вероятно вызвана наличием наледи, сохраняющейся на протяжении летнего периода.

Комплекс мониторинговых исследований 2022 г. включал в себя и оценку стока наносов. В целом для исследуемых рек сток наносов невелик и составляет в вершине УС от 0,01 до 1,25 кг/с. Выделялась органическая составляющая наносов, величины которых на пределе обнаружения приборов и составляла 0,0009 г/дм³. Для сравнения в прилегающих к устьям акваториях значения органики были выше – 0,078 г/дм³.

Заключение

Проведенное исследование по оценке распределения стока в устьевых системах показало относительно равномерный сток по рукавам р. Голоустной и значительные вариации долей стока по разветвленной устьевой системе

р. Сарма. Данное обстоятельство может быть связано с регулирующим влиянием наледных проявлений, гипсометрическим положением эрозионных врезов руслоевой сети, а также мощностью и фильтрационными свойствами пород, слагающих конус выноса, на режим и баланс поверхностного стока.

На рассматриваемых объектах выявлена значительная величина невязки баланса стока между вершинами УС и по рукавам. Таким образом, мы считаем, что невязка обусловлена фильтрацией части речного стока через отложения конуса выноса и подрусловым стоком. Для более достоверной оценки распределения стока и подрусловой его составляющей необходимо проведение мониторинга уровня и скорости фильтрации в нескольких скважинах на поймах рукавов УС.

Исследования были проведены в рамках НИР № 122010800014-7; № AAAA-A21-121012190059-5.

Список литературы

1. Амосова И. Ю., Ильичева Е. А. Структурно-гидрографический анализ речных систем бассейна озера Байкал // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география. 2017. № 4. С. 16–23.
2. Залогин Б. С., Родионов Н. А. Устьевые области рек СССР. М. : Мысль, 1969. 312 с.
3. Коротаев В. Н. Геоморфология речных дельт. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1991. 234 с.
4. Корытный Л. М. Морфометрические характеристики речного бассейна //География и природные ресурсы. 1984. № 3. С. 105–112.
5. Макаров С. А. Сели Прибайкалья. Иркутск : Изд-во Ин-та географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2012. 111 с.
6. Исследование устьевых зон притоков озера Байкал (на примере реки Голоустная) / С. А. Макаров, И. А. Белозерцева, Н. В. Власова, И. Б. Воробьева, О. В. Гагаринова, М. Ю. Опекунова // Успехи современного естествознания. 2019. № 9. С. 65–72;
7. Михайлова В. Н. Гидрология устьев рек : метод. пособие. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1996. 88 с.
8. Самойлов И. В. Устья рек. М. : Географгиз, 1952. – 526 с.
9. Illicheva E. A., Pavlov M. V., Andreev F. M. Morphodynamics of the river mouth systems of the southern Baikal depression // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : International Scientific and Practical Conference in Commemoration of Corr. Mem., RAS, A. N. Antipov “Geographical Foundations and Ecological Principles of the Regional Policy of Nature Management”, Irkutsk : Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012034>.
10. АИС ГМВО. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 05.10.2022).
11. WMO. URL: <http://pogodaiklimat.ru/weather.php?id=30629> (дата обращения: 25.10.2022).

УДК 551.510.42

Исследование процессов осаждения аэрозолей на акваторию озера Байкал

И. В. Латышева (ababab1967@mail.ru)¹, В. Л. Потемкин (klimat@lin.irk.ru)²,
В. Л. Макухин (aerosol@lin.irk.ru)²

¹Иркутский государственный университет, Иркутск

²Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

Аннотация. Целью исследования являлась оценка интенсивности осаждения аэрозолей на акваторию озера Байкал по измеренным значениям их счетной концентрации. Измерения проводились летом 2019 г. с 25 июля по 3 августа на научно-исследовательском судне «Академик Коптюг» по маршруту Листвянка – Хужир – Северобайкальск – Усть-Баргузин – Байкальск – Листвянка. Для расчетов скоростей осаждения аэрозолей использовано аналитическое решение модифицированной формы первого закона Фика. Получены зависимости рассчитанных скоростей осаждения по аналитическому решению от температуры окружающей среды, плотности аэрозолей и скорости трения. Проведенные исследования показали, что пожары в Якутии вносят определенный вклад в концентрацию аэрозольных частиц в атмосфере оз. Байкал и в интенсивность осаждения аэрозолей на акваторию озера.

Ключевые слова: аэрозоли, осаждение, оз. Байкал, аналитическое решение, пожары.

Введение

Охране оз. Байкал, включая атмосферную среду над ним, уделяется большое внимание. Наибольшее беспокойство вызывает загрязнение воздушного бассейна над южной котловиной озера, где происходит перенос атмосферных выбросов не только от довольно значительных местных источников (города Байкальск и Слюдянка), но и от крупнейших региональных промышленных центров, в частности Иркутска и Ангарска. Комплексные исследования процессов распространения, трансформации и осаждения загрязняющих веществ в атмосфере региона оз. Байкал позволяют дать рекомендации по улучшению экологии этого участка Мирового природного наследия. Наряду с экспериментальным изучением процессов загрязнения атмосферы, проводимым с использованием приборов, широкое распространение получили исследования с помощью математических моделей распространения и трансформации примесей, позволяющих детально проанализировать сложные атмосферные процессы, не прибегая к дорогостоящим натурным экспериментам.

Для решения задач атмосферного переноса аэрозолей требуются граничные условия, которые определяются процессами осаждения аэрозолей на граничных поверхностях. Ведущими механизмами осаждения являются броуновская диффузия в пограничном слое и седиментация, а также турбофорез. В предыдущих исследованиях были опубликованы различные модели осаждения частиц [6]. Авторы работы [9] вывели трехслойную модель, основанную на законе Фика. В работе [8] была получена модель, основанная на модели RNG $k-\varepsilon$ [4; 10], и модели вихревого взаимодействия [7]. В работе [5] была представлена нестационарная трехслойная модель. Авторы [15] улучшили трехслойную модель, доба-

вив турбофоретический эффект в уравнение осаждения, и получили аналитические решения. Аналитические решения были получены также в работах [2; 13]. Подобные решения использовались при исследованиях осаждения частиц в трубопроводах системы вентиляции [3], моделировании рассеивания и осаждения выбрасываемых частиц в помещении [14].

Цель и методы исследования

Целью исследования являлась оценка интенсивности осаждения аэрозолей на акваторию оз. Байкал по измеренным значениям их счетной концентрации. Измерения проводились летом 2019 г. с 25 июля по 3 августа на научно-исследовательском судне «Академик Коптюг» по маршруту Листвянка – Хужир – Северобайкальск – Усть-Баргузин – Байкальск – Листвянка.

Для расчетов скоростей осаждения аэрозолей использовано аналитическое решение [1; 2; 13]:

$$\begin{aligned}
 u_d &= \frac{u^*}{J_1(r^+, \tau^+, Sc) + J_2(\tau^+, Sc)}. \\
 J_1(r^+, \tau^+, Sc) &= \frac{\exp(-1,2\tau^+)}{u_s^+(\tau^+)} \{1 - \exp[-u_s^+(\tau^+) \cdot I_{L-N}(r^+, Sc)]\}. \\
 I_{L-N}(r^+, Sc) &= 3,64(Sc)^{2/3}(a - b) + 39, \\
 a &= \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(10,92Sc^{-1/3} + 4,3)^3}{Sc^{-1} + 0,0609} \right] + \sqrt{3} \operatorname{arctg} \left[\frac{8,6 - 10,92Sc^{-1/3}}{10,92 \cdot \sqrt{3} \cdot Sc^{-1/3}} \right], \\
 b &= \frac{1}{2} \ln \left[\frac{(10,92Sc^{-1/3} + r^+)^3}{Sc^{-1} + 7,669 \cdot 10^{-4}(r^+)^3} \right] + \sqrt{3} \operatorname{arctg} \left[\frac{2r^+ - 10,92Sc^{-1/3}}{10,92 \cdot \sqrt{3} \cdot Sc^{-1/3}} \right]. \\
 J_2(\tau^+, Sc) &= \frac{1 - \exp \left[-\gamma(\tau^+, Sc) \left[1 + \frac{u_s^+(\tau^+)}{p(\tau^+)} \right] \right]}{p(\tau^+) + u_s^+(\tau^+)}. \\
 \gamma(\tau^+, Sc) &= \frac{0,4611 \cdot Sc \cdot \tau^+ \cdot (1 + 0,3859 \cdot \tau^+)}{(1 + 0,1193 \cdot \tau^+) \cdot (1 + 0,1193 \cdot \tau^+ + 6,613 \cdot Sc)}, \\
 p(\tau^+) &= \frac{\tau^+ \cdot (1 + 0,3859 \cdot \tau^+)}{65,06 \cdot (1 + 0,1193 \cdot \tau^+)^2}. \\
 \tau^+ &= \frac{\tau_p u^{*2}}{\nu}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь u_d – скорость осаждения; u^* – скорость трения; r^+ – безразмерный радиус частицы; τ^+ – безразмерное время релаксации частицы; Sc – число Шмидта; u_s^+ – скорость седиментации частицы; τ_p – время релаксации частицы; ν – молекулярная вязкость среды. Все величины представлены в единицах СИ.

На рис. 1 представлены результаты сравнения значений скорости осаждения, рассчитанных в работе [2], измеренных в полевых условиях из работы [11], и полученных при выполнении данной работы по аналитическому решению (1).

Отмечено хорошее качественное и количественное соответствие рассчитанных и измеренных значений.

Получены зависимости рассчитанных скоростей осаждения по аналитическому решению (1) от температуры окружающей среды, плотности аэрозолей и скорости трения. При повышении температуры скорость осаждения уменьшается; при увеличении значений скорости трения скорость осаждения возрастает.

Результаты исследования

Летом 2019 г. во время полевых работ на оз. Байкал с 25 июля по 3 августа были получены значения счетных концентраций аэрозолей (плотность $2 \text{ г}/\text{см}^3$) радиусом 0,3; 0,5; 1; 2,5; 5 и 10 мкм на всей акватории озера. Измерение концентраций аэрозолей сопровождалось фиксацией метеорологических характеристик. Используя аналитическое решение (1), были рассчитаны скорости осаждения аэрозолей каждой фракции, составившие в среднем 0,022; 0,06; 0,24; 1,48; 5,59 и 18,9 мм/с соответственно. Далее были выполнены оценки интенсивности осаждения аэрозолей на водную поверхность озера.

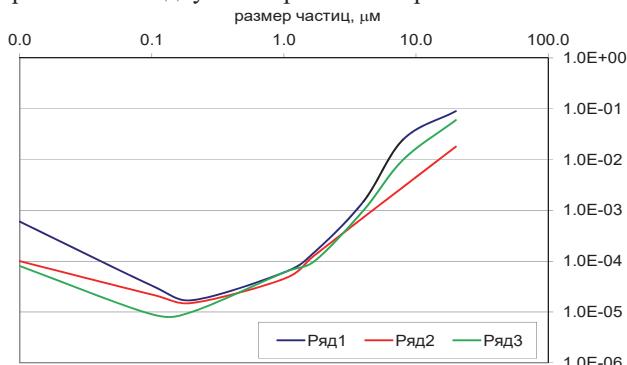


Рис. 1. Сравнение скоростей сухого осаждения на горизонтальную поверхность.

По горизонтальной оси отложен диаметр аэрозольных частиц в мкм (логарифмическая шкала), по вертикальной – скорость осаждения в м/с (логарифмическая шкала): Ряд 1 – расчетная скорость осаждения аэрозолей из работы [2], Ряд 2 – расчетная скорость осаждения аэрозолей по формулам (1), Ряд 3 – измеренная скорость осаждения из работы [11].

Результат суммарного осаждения всех частиц представлен на рис. 2. Однако детальный анализ изменчивости скорости осаждения по фракциям частиц показал интересные особенности межсугодичной динамики концентраций частиц по размерам.

Расчетные значения интенсивности осаждения аэрозолей, около $0,6 \text{ мкг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, получены 30.07 в 4 ч на стоянке у м. Верхнее Изголовье (рис. 2); основной вклад (82 %) внесли частицы радиусом 2,5 и 5 мкм, счетная концентрация аэрозолей радиусом 2,5 мкм превышала среднее значение почти в 5 раз, радиусом 5 мкм – более чем в 3 раза. Счетная концентрация аэrozолей радиусом 0,3 мкм превышала среднее значение более чем в 2 раза, радиусом 0,5 мкм – более чем в 3 раза, радиусом 1 мкм – более чем на порядок. Отмечен запах дыма от

пожаров в Якутии. Большое значение интенсивности осаждения могло быть вызвано поступлением аэрозольных частиц в результате якутских пожаров.

Расчетные значения интенсивности осаждения аэrozолей, несколько более 0,6 мкг/(м²·с), получены 1.08 в 6 часов местного времени на переходе м. Тонкий – Харауз (рис. 2); основной вклад (81 %) внесли частицы радиусом 2,5 и 5 мкм, счетная концентрация аэrozолей радиусом 2,5 мкм превышала среднее значение более чем в 3 раза, радиусом 5 мкм – более чем в 4 раза. Превышение счетной концентрации над средними отмечено и для других фракций: концентрация аэrozолей радиусом 0,3 мкм превышала среднее значение почти в 2 раза, радиусом 0,5 мкм – также почти в 2 раза, радиусом 1 мкм – более чем в 2 раза. Также отмечен запах дыма от пожаров в Якутии. Большое значение интенсивности осаждения тоже могло быть вызвано поступлением аэrozольных частиц в результате якутских пожаров.

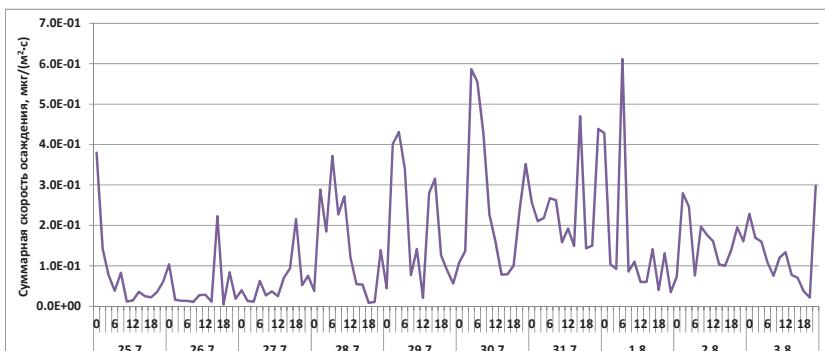


Рис. 2. Суммарная интенсивность осаждения, в мкг/(м²·с), аэrozолей всех измеренных радиусов на поверхность оз. Байкал по данным экспедиционных исследований летом 2019 г. на научно-исследовательском судне

Расчетные значения интенсивности осаждения аэrozолей более 0,4 мкг/(м²·с), получены 31.07 в 16 часов местного времени в Турке (рис. 2); основной вклад (76 %) внесли частицы радиусом 5 и 10 мкм, счетная концентрация аэrozолей радиусом 5 мкм превышала среднее значение более чем в 3 раза, радиусом 10 мкм – почти в 5 раз. Превышение счетной концентрации над средними отмечено и для других фракций: концентрация аэrozолей радиусом 0,3 мкм превышала среднее значение более чем в 2 раза, радиусом 0,5 мкм – также более чем в 2 раза, радиусом 1 мкм – почти в 2 раза, радиусом 2,5 мкм – также почти в 2 раза. Отмечен запах дыма от пожаров в Якутии. Повышенное значение интенсивности осаждения тоже могло быть вызвано поступлением аэrozольных частиц в результате якутских пожаров.

Расчетные значения интенсивности осаждения аэrozолей также более 0,4 мкг/(м²·с), получены 31.07 в 22 часов местного времени при подходе к м. Тонкий (рис. 2); основной вклад (61 %) внесли частицы радиусом 5 мкм, счетная

концентрация аэрозолей радиусом 5 мкм превышала среднее значение более чем в 3 раза. Превышение счетной концентрации над средними отмечено и для других фракций: концентрация аэрозолей радиусом 0,3 мкм превышала среднее значение более чем в 2 раза, радиусом 0,5 мкм – почти в 3 раза, радиусом 1 мкм – более чем в 2 раза, радиусом 2,5 мкм – почти в 2 раза. Отмечен запах дыма от пожаров в Якутии. Повышенное значение интенсивности осаждения тоже могло быть вызвано поступлением аэрозольных частиц в результате якутских пожаров.

Выводы

Получены зависимости расчетной скорости осаждения по формулам (1) от температуры окружающей среды, плотности аэрозолей, скорости трения. При повышении температуры скорость осаждения уменьшается; при увеличении значений скорости трения скорость осаждения возрастает.

Проведенные исследования показали, что пожары в Якутии вносят определенный вклад в концентрацию аэрозольных частиц в атмосфере Байкала и в интенсивность осаждения аэрозолей на акваторию озера.

Работа выполнена в рамках гос. задания ЛИН СО РАН № 0279-2021-0014.

Список литературы

1. Верификация моделей осаждения продуктов деления в первом контуре ЯЭУ (диффузия, термофорез, турбофорез) в расчетном комплексе СОКРАТ/В3 / В. М. Алипченков [и др.] // Известия РАН. Энергетика. 2013. № 3. С. 53–59.
2. Пискунов В. Н. Динамика аэрозолей. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2010. 296 с.
3. Bayram A., Korobenko A. Modelling the transport of expelled cough particles using an Eulerian approach and the variational multiscale method // Atmospheric Environment. 2022. Vol. 271. P. 1–16.
4. Chen Q. Y. Comparison of different k- ϵ models for indoor air flow computations // Numerical Heat Transfer B. 1995. Vol. 28, N 3. P. 353–369.
5. Chiou M. C., Chiu C. H., Chen H. S. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow // Applied Mathematical Modelling. 2011. Vol. 35, N 7. P. 3238–3254.
6. Fan H., Hua J. Experimental Research and Modeling of Particle Deposition in Ventilation Ducts // Advances in Mechanical Engineering. 2016. Vol. 2013. P. 1–7.
7. Graham D. I., James P. W. Turbulent dispersion of particles using eddy interaction models // International Journal of Multiphase Flow. 1996. Vol. 22, N 1. P. 157–175.
8. Lai A. C. K., Chen F. Modeling particle deposition and distribution in a chamber with a two-equation Reynoldsaveraged Navier-Stokes model // Journal of Aerosol Science. 2006. Vol. 37, N 12. P. 1770–1780.
9. Lai A. C. K., Nazaroff W. W. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces // Journal of Aerosol Science. 2000. Vol. 31, N 4. P. 463–476.
10. Posner J. D., Buchanan C. R., Dunn-Rankin D. Measurement and prediction of indoor air flow in amodel room // Energy and Buildings. 2003. Vol. 35, N 5. P. 515–526.
11. Sehmel G. A. Particle eddy diffusivities and deposition for isothermal flow and smooth surfaces // J. Aerosol Sci. 1973. Vol. 4. P. 125–138.
12. Slinn W. G. N. Parameterization for resuspension and for Wet and Dry Deposition of Particles and Gases for Use in Radiation Dose Calculations // Nucl. Safety. 1978. Vol. 19, N 2. P. 205–219.
13. Submicron particle dynamics for different surfaces under quiescent and turbulent conditions / Vohra K., Ghosh K., Tripathi S. N., Thangamani I., Goyal P., Dutta A., Verma V. // Atmospheric Environment. 2017. Vol. 152. P. 330–344.
14. Experimental study on particle deposition in pipelines in a fresh air system / Zhang X. [et al.] // Thermal Science. 2021. Vol. 25, N 38. P. 2319–2325.
15. Zhao B., Wu J. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation duct // Atmospheric Environment. 2006. Vol. 40, N 3. P. 457–466.

УДК 546.49

Предварительные результаты измерения общей ртути в атмосферных осадках в теплый период в Южном Прибайкалье

Е. С. Луцкин (Lutskin2000@mail.ru)^{1,2}, М. Ю. Шиховцев (Max97irk@yandex.ru)¹,
О. И. Хуриганова (Khuriganowa@mail.ru)¹

¹Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

²Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Работа посвящена изучению динамики содержания общей ртути в атмосферных осадках Южного Прибайкалья на станции мониторинга Листвянка (51,9 с. ш., 104,4 в. д.) за период 23.05.2022 по 8.08.2022. Подготовка проб для химического анализа и измерение концентраций ртути выполнялась по методике ПНД Ф 14.1:2:4.271-2012 – метод А (перманганатная минерализация). Средняя концентрация общей ртути в атмосферных осадках на станции Листвянка весной и летом 2022 г. равна ~ 25 нг/л. Наибольшие концентрации Hg зафиксированы в атмосферных осадках, выпавших в начале сезона. Наименьшие – в конце июля (с 22 по 30 июля). Чтобы подтвердить возможности воздействия удаленных групп источников на состояние воздушного бассейна над юго-западным побережьем оз. Байкал (ст. Листвянка) использована траекторная модель HYSPLIT. Для каждого дня с атмосферными осадками по архивным метеорологическим данным построены обратные траектории движения воздушных масс. Полученные результаты дали возможность предполагать, что на состав атмосферных выпадений на станции оказывают влияние региональные антропогенные источники.

Ключевые слова: общая ртуть, содержание, атмосферные осадки, модель HYSPLIT, Листвянка.

Введение

Ртуть – природный элемент, находящийся во всех природных средах и имеющий свои естественные геохимические циклы, которые до сих пор до конца не изучены. Ртуть признана глобальным загрязнителем окружающей среды вследствие ее токсичности, мобильности и способности к накоплению в различных природных объектах.

Попадая в воздушное пространство из земной поверхности или с антропогенными выбросами, соединения ртути выпадают на земную или водную поверхность как вблизи источников загрязнения, так и на большом расстоянии от них в результате атмосферного переноса. В водных экосистемах микроорганизмы превращают ее в метилртуть. Соединение метилртуть гораздо токсичнее элементарной ртути. В этой форме ртуть проникает в пищевые цепи и накапливается в водных организмах, включая рыб и моллюсков, а также птиц, млекопитающих и человека, который ими питается. В некоторых видах рыб концентрация метилртути может быть в десятки раз выше, чем ее содержание в воде, где обитает эта рыба. В процессе воспроизведения метилртуть передается от материнского организма развивающемуся плоду, в котором она накапливается, и может достигать высоких концентраций.

Учитывая глобальный характер проблемы ртути и наше ограниченное понимание этих процессов, в 2009 г. началась работа над Минаматской конвенцией по ртути. Конвенция представляет собой попытку полностью понять и уменьшить попадание антропогенной ртути в окружающую среду для ее защиты и защиты здоровья человека. Конвенция вступила в силу 16 августа 2017 г., в настоящее время 128 стран ее подписали, 110 стран ратифицировали [12].

Сжигание угля рассматривается сегодня в качестве крупнейшего отдельно взятого глобального источника выбросов ртути в атмосферу. Как известно, значительная часть угля используется в производстве электроэнергии. Ртуть также попадает в окружающую среду от металлургических, химических заводов, при производстве ртутных элементов и хлора/щелочи, от мусоросжигательных установок и других стационарных источников загрязнения.

Атмосферная ртуть может существовать в виде многих различных соединений, обычно рассматривается ее три различные «фракции», или первичные формы в атмосфере. К ним относятся: 1) газообразная элементарная ртуть, или Hg_0 , представленная в виде ионов, а также в составе органических и неорганических соединений, 2) газообразная окисленная ртуть, или ртуть в форме Hg^{2+} и реже в Hg^{1+} , и 3) ртуть, связанная с твердыми частицами (PM). Большинство ее измерений относится к PM, связанной с частицами размером менее 2,5 микрон в диаметре (PM 2,5) [12].

Ртуть в газообразной элементарной форме повсеместно распространена в атмосфере, и по оценке различных ученых на ее долю приходится 90–98 % от общего содержания, обусловленное высоким давлением ее пара [3]. Характерной особенностью ртути является низкая теплота парообразования, что обуславливает высокую летучесть ее паров, возможность их испарения не только с поверхности металлической ртути, но и диффузии через слои воды [1]. Испарение ртути происходит даже при температуре ниже точки ее замерзания ($-390^{\circ}C$), за счет этого создается «рутная атмосфера», которая объясняет рассеяние атомов ртути в различных сферах земли [4]. Время существования атомарной ртути в атмосфере варьируется от нескольких месяцев до 2 лет.

В свою очередь на долю окисленных и связанных с твердыми частицами формами ртути приходится менее 5 %. Окисленные формы ртути относительно быстро выводятся из атмосферы, выпадая на поверхность моря и суши. Время существования окисленной ртути (Hg^{2+}) в атмосфере изменяется от нескольких минут до нескольких дней. Нахождение в атмосфере ртути, сорбированной на аэрозольные частицы, зависит от размера частиц и составляет от нескольких дней до нескольких недель. Поэтому окисленные и сорбированные формы ртути вносят значительный вклад главным образом в осаждение в локальном и региональном масштабе вблизи от источников поступления [5].

Мониторинговые исследования атмосферной ртути ведутся по всему миру, например, в рамках проекта GMOS (Global mercury observation system – Глобальная система мониторинга ртути). Проект GMOS организован Европейской комиссией (<http://www.gmos.eu>) и стартовал в ноябре 2010 г. с целью создания со-

гласованной системы наблюдений за мониторингом ртути в глобальном масштабе, включая большую сеть наземных станций мониторинга, специальные периодические океанографические экспедиции и измерительные полеты в нижней и верхней тропосфере, а также в нижней стратосфере. На сегодняшний день более 40 наземных станций мониторинга составляют глобальную сеть, охватывающую многие регионы, где до GMOS практически не было данных наблюдений [13]. Единственная станция фонового мониторинга ртути в России расположена на станции Лимнологического института СО РАН в районе пос. Листвянка Иркутской обл. Мониторинговые исследования на станции ведутся более 10 лет [13].

Основным способом удаления ртути из атмосферы является мокрое осаждение, которое происходит в основном при выпадении осадков. Атмосферные осадки эффективно выводят из атмосферного воздуха как окисленные формы ртути, находящиеся в газообразной фазе, так и другие ее формы, содержащиеся в каплях облаков. Поглощая взвешенные примеси в процессе внутриоблачного и подоблачного вымывания, из атмосферы удаляются по большей части окисленные и связанные с частицами формы ртути, так как прямое мокрое удаление атомарной ртути очень мало из-за ее низкой растворимости [5]. Принимая во внимание актуальность проблемы ртутного загрязнения во всем мире и отдельных регионах, и исходя из выше сказанного, на станции Листвянка в 2022 г. начаты регулярные исследования по изучению содержания ртути в атмосферных осадках этого района Южного Прибайкалья.

Материалы и методы

Исследования содержания ртути в атмосферных осадках были проведены в Лимнологическом институте, в лаборатории гидрохимии и химии атмосферы. Подготовка проб для химического анализа выполнялась по ПНД Ф 14.1:2:4.271-2012 «Методика измерений массовой концентрации ртути в пробах природных, питьевых, минеральных, сточный вод атомно-абсорбционным методом с зеемановской коррекцией неселективного поглощения на анализаторе ртути РА-915М (М 01-51-2012)» с приставкой РП-92.

Метод измерений основан на кислотной минерализации пробы с последующим восстановлением катионов ртути раствором хлорида олова (II), переносе атомарной ртути в аналитическую кювету анализатора током воздуха (метод «холодного пара») и измерении атомного поглощения ртути на резонансной длине волны 253,7 нм.

Диапазон измерений массовой концентрации общей или растворенной ртути от 0,01 до 2000 мкг/л. Предел обнаружения – 0,0001 мкг/л при объеме пробы 5 мл.

Отбор проб проводился на станции мониторинга «Листвянка» (51,9 с. ш., 104,4 в. д.) с помощью автоматического осадкообразователя US-320. За период с 23.05.2022 по 8.08.2022 было отобрано 13 проб дождей. Расположение станции на вершине прибрежного холма, примерно 200 м над уровнем озера, в отдалении

от населенного пункта позволяет избегать влияния локальных источников загрязнения атмосферы и отслеживать региональные и глобальные переносы загрязнения.

Чтобы выяснить влияния метеорологических факторов и переносов воздушных масс на изменение химического состава атмосферных осадков на территории этого района побережья озера была использована модель HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model). По метеорологическим данным архива NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, США) для каждого дня с осадками были рассчитаны обратные траектории движения воздушных масс. Все обратные траектории моделировались в соответствии с временем выпадения атмосферных осадков над станцией. Периодом, за который проводился расчет, был выбран равным 72 ч, в отдельных случаях рассматривался период равный 5 суткам. Расчеты выполнялись для уровня перемещения атмосферных осадков – 800 м над уровнем земли. Учитывая, что значимым источником выбросов в регионе являются объекты теплоэнергетики, было рассмотрено вещество-индикатор данных источников – диоксид азота. Определение концентрации данных веществ в атмосфере осуществлялось с помощью хемилюминисцентного газоанализатора РА-310А (NO_2) производства ОПТЕК (Санкт-Петербург, Россия).

Результаты исследования

На основании данных, полученных на станции фонового мониторинга атмосферной ртути в течение нескольких лет, средняя фоновая концентрация общей ртути в атмосферном воздухе за период наблюдений с ноября 2011 по февраль 2015 г. составила $1,39 \text{ нг}/\text{м}^3$ [6], а за отчетный период с ноября 2011 г. по декабрь 2020 г. – $1,59 \text{ нг}/\text{м}^3$. Для холодного времени года средняя фоновая концентрация на станции Листвянка составляла $1,75 \text{ нг}/\text{м}^3$, что выше по сравнению со средней фоновой концентрацией, полученной для теплого времени года. Разница между концентрациями ртути в холодное и теплое время года составила $0,31 \text{ нг}/\text{м}^3$ [13].

Стоить отметить, что согласно СанПиН 1.2.3685-21, ПДК (предельно допустимая концентрация) ртути в атмосферном воздухе городских и сельских поселений составляет $300 \text{ нг}/\text{м}^3$ (среднесуточная); в воздухе рабочей зоны – $5000 \text{ нг}/\text{м}^3$ (среднесменная) и $10000 \text{ нг}/\text{м}^3$ (максимальная разовая). Однако гигиенических нормативов содержания ртути в атмосферных осадках не существует.

Исследование содержания общей ртути в атмосферных осадках, выпавших в теплый период на станции «Листвянка», показало, что концентрации Hg варьируются в пределах от 16 до $50 \text{ нг}/\text{л}$ (рис. 1). Средняя концентрация ртути в атмосферных осадках составила $25 \text{ нг}/\text{л}$.

Для понимания картины ртутного загрязнения в атмосферном воздухе и в атмосферных осадках на побережье Южного Байкала, был проведен сравнительный-литературный анализ, основанный на данных мировых и отечественных исследований, который представлен в табл. 1 [2; 6–9; 11–15].

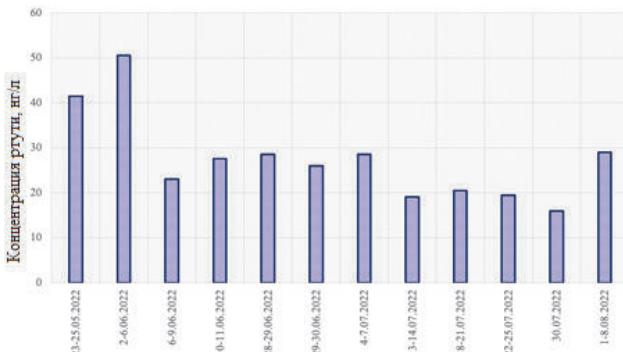


Рис. 1. Содержание общей ртути в атмосферных осадках за весь
за период с 23.05.2022 по 8.08.2022

Таблица

Сравнение осредненных концентраций общей ртути в атмосферных осадках
и атмосферном воздухе в разных местах мира

Местоположение	Концен- трация	Автор, год
Атмосферный воздух, нг/м³		
Северное полушарие	1,5–1,7	Lindberg et al., 2007
Станция «Листвянка»	1,59	Машьянин и др., 2021
Атмосферные осадки, нг/л		
Dhunche (сельская местность)	6,7	Tripathee et al., 2019
Kathmandu (городская местность)	18,25	
Dimsa (удаленная станция)	7,13	
Gosainkunda (высокогорье)	6,51	
Lsaha, Tibetan Plateau (TP) (городская местность)	24,8	Huang et al., 2013
Seoul, Korea, (городская местность)	16,3	Seo et al., 2012
Korea (сельская местность)	8,8	Ahn et al., 2014
Potsdam, New York USA (сельская местность)	5,5	Lai et al., 2007
Lake Michigan, USA (сельская местность)	15,7	Landis and Keeler, 2002
Guiyang City, China (городская местность)	32,9	Feng et al. 2002
Барнаул, Россия (городская местность)	13,11	Шоль и др., 2019
Астраханский биосферный заповедник (БЗ), Россия	1360	Бурцева и Александрова, 2022
Воронежский БЗ, Россия	280	
Приокско-Террасный БЗ, Россия	450	
Кавказский БЗ, Россия	640	
Алтайский БЗ, Россия	77	
Листвянка, Россия (сельская местность)	25	Данная статья

Сравнивая полученные результаты с данными мировых и отечественных исследователей, представленными в табл., можно сделать вывод о том, что содержание общей ртути в атмосферных осадках сопоставимы. Поскольку расстояние от ближайшего крупного антропогенного источника «Ново-Иркутская ТЭЦ» в г. Иркутске до станции «Листвянка» составляет всего 62 км содержание

ртути в атмосферных осадках как для территории сельской местности выше, чем по миру (5,5–15 нг/л), но не выходит за пределы городской агломерации (13–33 нг/л), однако сравнивая результаты с данными мониторинга с 2001 по 2020 г., проведенными на территории Алтайского биосферного заповедника (32–310 нг/л), результаты на порядок ниже.

Как известно, на формирование химического состава атмосферных выпадений оказывает влияние местный фон, регион формирования воздушной массы, принесший атмосферные осадки и синоптические условия. Совместный анализ атмосферных осадков с повышенным содержанием ртути и обратных траекторий показал, что воздушные массы, принесшие осадки на станцию Листвянка, во всех рассмотренных случаях оказывались под воздействием антропогенных выбросов от источников, расположенных в долине р. Ангары (рис. 2).

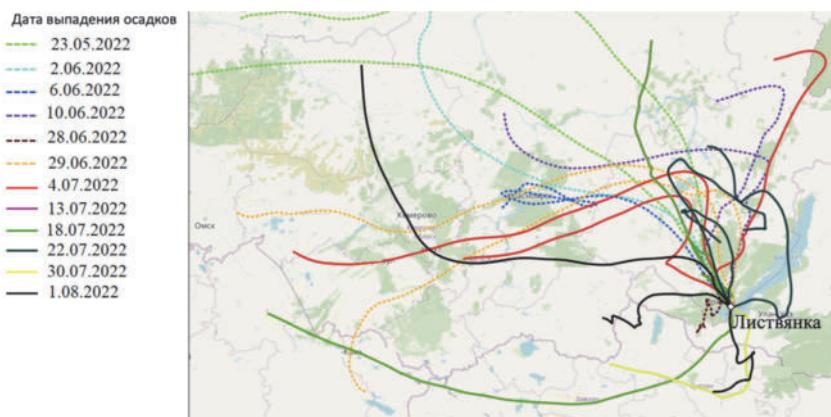


Рис. 2. Обратные траектории движения воздушных масс на станцию «Листвянка» за весь период исследования

Как видно из рис. 2, атмосферные осадки, имеющие концентрацию меньше среднего значения (18.07.2022 – 20,5 нг/л; 22.07.2022 – 19,5 нг/л; 30.07.2022 – 16 нг/л), сформировались над фоновыми районами, что может подтверждать антропогенное влияния промышленных центров Прибайкалья на предыдущую группу осадков.

Как известно в промышленных центрах региона 62–75 % выбросов поступает в атмосферу от объектов теплоэнергетики. Одним из веществ-индикаторов источников, сжигающих органическое топливо, является диоксид азота. Для подтверждения единой группы источников ртути и диоксида азота на рис. 3 приведен момент выпадения атмосферных осадков с повышенным содержанием ртути (42 нг/л). Как видно из рис. 3 на станции зарегистрировано повышение концентрации NO_2 с 5–10 $\mu\text{г}/\text{м}^3$ до 20 $\mu\text{г}/\text{м}^3$. Это в совокупности с траекторным анализом позволяет говорить о том, что за увеличение содержания ртути в атмосферных осадках Южного Прибайкалья ответственен антропогенный фактор, в частности объекты, сжигающие уголь.

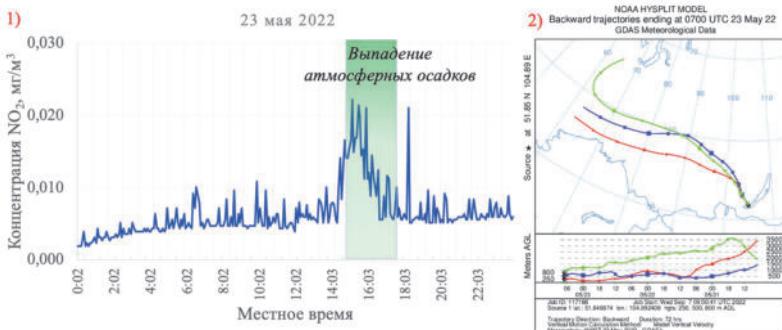


Рис. 3. 1) суточная изменчивость диоксида азота 23 мая 2022 г. на станции «Листвянка»;
2) обратная траектория движения воздушных масс на станцию «Листвянка» для
15:00 местного времени 23 мая 2022 г.

Список литературы

1. Мониторинг ртути в окружающей среде / А. Б. Антипов, Е. Ю. Генина, Н. Г. Мельников, Г. В. Кацкан, Н. А. Озерова // Химия в интересах устойчивого развития. 1999. Т. 7, № 1.
2. Бурцева Л. В., Александрова М. С. Анализ данных мониторинга состояния загрязнения тяжелыми металлами атмосферных осадков и поверхностных вод на территории Алтайского государственного биосферного заповедника // Полевые исследования в Алтайском биосфера заповеднике. 2022. № 4. С. 127–136. https://doi.org/10.52245/26867109_2022_4_127
3. Гладышев В. П., Левицкая С. А., Филиппова Л. М. Аналитическая химия ртути. М. : Наука. 1974. 331 с.
4. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В. И. Гребенщикова, Э. Е. Лустенберг, Н. А. Китаев, И. С. Ломоносов. Новосибирск : Акад. изд-во «Гео», 2008. 234 с.
5. Калинчук В. В. Атомарная ртуть в приводном слое атмосферы дальневосточных морей России в летне-осенний период : 25.00.28 : дис. ... канд. геогр. наук. Владивосток, 2016. 22 с.
6. Проект GMOS (global mercury observation system). Мониторинг атмосферной ртути на станции Листвянка / Н. Р. Машьянов, В. А. Оболкин, Т. В. Ходжер, С. Е. Шолупов, В. В. Рыжков, С. Е. Погарев // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты. 2015. С. 258–261.
7. Шоль Л. В., Эйрих С. С., Ильина Е. Г. Содержание ртути и ее сезонная динамика в атмосферных осадках г. Барнаула // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности : материалы XII Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых с междунар. участием, Бийск, 22–24 мая 2019 г. Бийск : Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова, 2019. С. 195–197.
8. Mercury wet deposition in rural Korea: concentrations and fluxes / M. C. Ahn, M. Yi S., T. M. Holsen, Y. J. Han // Environ. Monit. 2011. Vol. 13, N 10. P. 2748–2754.
9. Atmospheric deposition of trace elements recorded in snow from the Mt. Nyainqntanglha region, southern Tibetan Plateau / J. Huang [et al.]. // Chemosphere. 2013. Vol. 92, N 8. P. 871–881.
10. Landis M. S., Keeler G. J. Atmospheric mercury deposition to Lake Michigan during the Lake Michigan mass study // Environmental Science & Technology. 2002. Vol. 36. P. 4518–4524.
11. Occurrence, emissions and deposition of mercury during coal combustion in the Province Guizhou, China / X. Feng, J. Sommar, O. Lindqvist, Y. Hong // Water, Air, & Soil Pollution. 2002. Vol. 139. P. 311–324.
12. A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition / S. Lindberg, R. Bullock, R. Ebinghaus, D. Engstrom, X. Feng, W. Fitzgerald, N. Pirrone, E. Prestbo, C. Seigneur // Ambio. 2007. N 36 (1). P. 19–32.
13. Air mercury monitoring at the Baikal area / Mashyanov N. [et al.] // Atmosphere. 2021. Vol. 12, N 7. <https://doi.org/10.3390/atmos12070807>.
14. Characteristics of total mercury wet deposition: scavenging of atmospheric mercury species / Y. S. Seo, Y. J. Han, H. D. Choi, T. M. Holsen, S. M. Yi // Atmos. Environ. 2012. Vol. 49. P. 69–76.
15. Spatial and temporal distribution of total mercury in atmospheric wet precipitation at four sites from the Nepal-Himalayas / L. Tripathee, J. Guo, S. Kang, R. Paudyal, J. Huang, C. M. Sharma, Q. Zhang, P. Chen, P. S. Ghimire, M. Sigdel // Sci Total Environ. 2019. Vol. 655. P. 1207–1217. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.338>.

УДК 551.590.21

Методы и средства наблюдений за космической погодой и ее влияние на полеты воздушных судов

А. П. Сокolina (nst.palna@yandex.ru), О. В. Волобуева (ovvolobueva@rshu.ru)

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Аннотация. Исследуются методы и средства прогноза космической погоды, оценивается ее прикладная ценность для авиационной метеорологии. Рассматриваются механизмы появления опасных гелиогеофизических явлений, их влияние на полеты воздушных судов. Особое внимание уделяется влиянию космической погоды на высокочастотную связь, системы навигации и на здоровье летного экипажа. Перечисляются методы и средства наблюдений за космической погодой, органы, ответственные за доступность и презентабельность информации для органов метеорологического слежения и авиационных пользователей. Приводятся некоторые примеры визуализации данных о космической погоде для потребителей.

Ключевые слова: космическая погода, авиационная метеорология, опасные гелиогеофизические явления

Введение

Технический прогресс не стоит на месте, постоянно развивающаяся отрасль авиации приводит к тому, что вслед за электронной техникой и различными навигационными системами возрастает спрос и на метеорологическое обеспечение полетов. Современные методы и средства метеорологических наблюдений отныне включают в себя не только наземные станции и прогностическую работу синоптика, но и слежение за космической погодой и ее возможными эффектами.

Космическая погода – совокупность явлений, происходящих на поверхности Солнца, в межпланетной среде, околоземном космическом пространстве и атмосфере Земли. Существенное влияние на возникновение так называемых опасных гелиогеофизических явлений (ОГЯ) оказывают солнечные вспышки, корональные выбросы массы, солнечный ветер – взаимодействуя с магнитосферой земли, перечисленные явления вызывают возмущения, более знакомые нам как суббури и магнитные бури. Эти возмущения приводят к неполадкам в системах связи и навигации, особенно в спутниковом позиционировании, и представляют угрозу для здоровья летного экипажа [2; 3].

За состоянием Солнца ведутся наблюдения с помощью различных телескопов, коронографов, спектрографов и спектрографов. Пример изображения, полученного с помощью коронографа, приведен на рис. 1. В России есть несколько наземных коронографов, к примеру, коронограф с экваториальным куполом в составе Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН и малый внезатмениальный коронограф системы Лио Кисловодской горной астрономической станции. Однако чаще применяются изображения, полученные с помощью коронографов, расположенных в открытом космосе, так как они намного эффективнее [8].

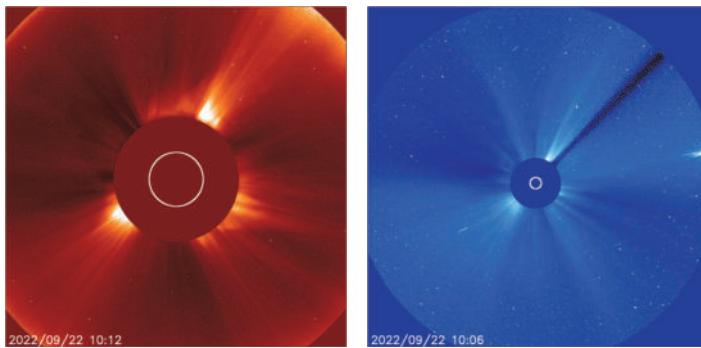


Рис. 1. Пример данных о состоянии солнечной короны, основанные на снимках с коронографа LASCO C2 и C3

Влияние космической погоды на полеты воздушных судов

Связь воздушного судна и центра управления полетами производится и через системы САТКОМ, и в высокочастотном диапазоне длин волн. Радиоволна проходит сквозь слои ионосфера, ее траектория и амплитудно-частотные характеристики зависят от состояния магнитного поля Земли и плотности потоков солнечного излучения, т. е. от параметров космической погоды. Возмущения космической погоды приводят также к ошибкам в определении местоположения самолета из-за изменения концентрации заряженных частиц на пути сигнала от передатчика к приемнику, в следствии чего возникают проблемы в определении временных задержек, которые используются для расчета координат. Кроме того, во время сильных солнечных бурь могут появляться так называемые мерцания, из-за чего возникают потери сигнала [1; 3].

Наблюдения за космической погодой проводятся комплексно и представляют собой систему космической и наземной аппаратуры. Различные ионосферные станции, обсерватории, телескопы, GNSS-приемники обеспечивают информацией с поверхности Земли; средства измерений ультрафиолетового и рентгеновского солнечного излучения, устройства слежения за потоком заряженных частиц и показаниями магнитного поля установлены в составе гелиогеофизического комплекса отечественных метеорологических космических аппаратов «Метеор-М», «Электро-М». Все это обеспечивает непрерывный мониторинг и анализ космической погоды [2].

Возмущения погоды носят глобальный характер, поэтому слежение за космической погодой производится Международной службой окружающей космической среды (ISES). В список задач данной службы входят наблюдения, сбор, составление и обмен данными о состоянии ионосферы, магнитосферы и различных гелиогеофизических параметров. Существуют несколько глобальных центров космической погоды: PECASUS (Консорциум Финляндия – Соединенное королевство), ACFJ (Консорциум Австралия – Канада – Франция – Япония), NOAA/SWPC (США) и Российская Федерация – Китай. В России эти функции

осуществляет ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова» (ФГБУ «ИПГ») [4].

Рассмотрим подробнее влияние космической погоды на полеты воздушных судов, основываясь на методах и средствах измерений степени возмущенности магнитосфера и ионосфера Земли консорциума PECASUS. Наглядные примеры в виде рис. 2–4 представлены ниже.

Радиация на уровне полета особенно опасна при полетах в высоких широтах. Измерения поступивших в атмосферу галактических космических лучей (ГКЛ) проводится наземными нейтронными мониторами, предназначенными для измерения количества высокоэнергетических заряженных частиц. Во время сильной геомагнитной бури эти частицы попадают в нашу атмосферу и создают вторичные частицы, улавливаемые мониторами. Когда более трех станций регистрируют значительное увеличение радиации, подразумевается, что доза облучения будет критической и на высотах полетов самолетов [5].

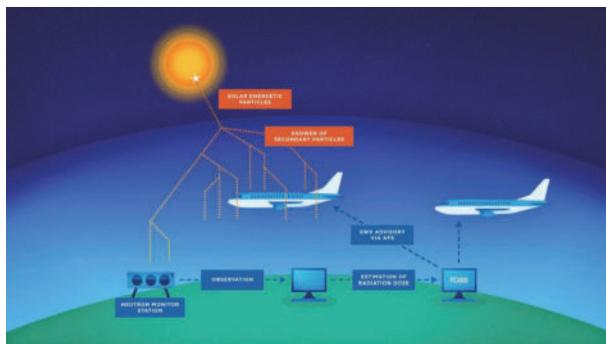


Рис. 2. Пример измерения дозы радиации, создающей опасность для экипажей воздушных судов

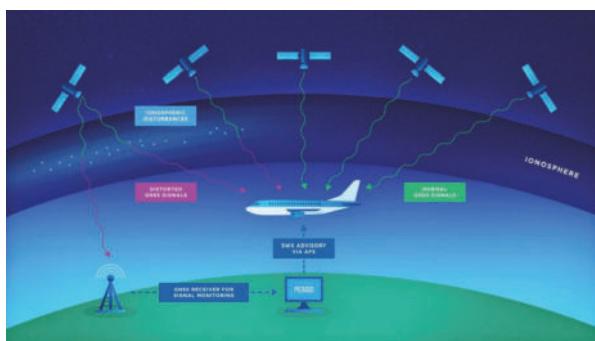


Рис. 3. Пример регистрации проблем со спутниковой связью, создающей опасность для экипажей воздушных судов

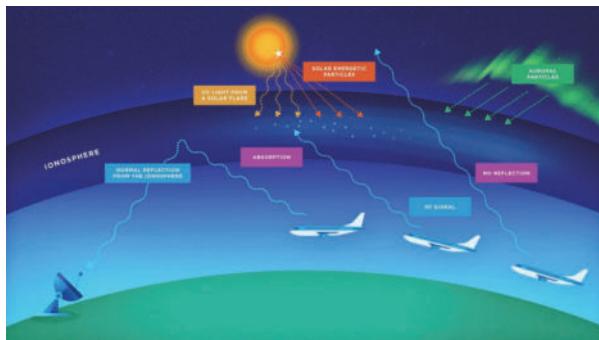


Рис. 4. Причины помех высокочастотной связи

На спутниковую связь, навигацию и наблюдения значительно влияют солнечные вспышки и солнечный ветер. Данные явления создают в ионосфере возмущения, достигающие масштаба от десятков метров до десятков километров. Возмущения препятствуют прохождению спутниковых сигналов: радиоволна сильно меняет свою амплитуду и фазу, а создаваемое мерцание может помешать приемнику зафиксировать сигнал и сделать невозможным вычисление местоположения самолета. Неполадки в системах связи со спутниками улавливает наземный приемник для мониторинга сигналов [1; 5].

На спутниковую связь, навигацию и наблюдения значительно влияют солнечные вспышки и солнечный ветер. Данные явления создают в ионосфере возмущения, достигающие масштаба от десятков метров до десятков километров. Возмущения препятствуют прохождению спутниковых сигналов: радиоволна сильно меняет свою амплитуду и фазу, а создаваемое мерцание может помешать приемнику зафиксировать сигнал и сделать невозможным вычисление местоположения самолета. Неполадки в системах связи со спутниками улавливает наземный приемник для мониторинга сигналов [1; 5].

Методы и средства наблюдений за космической погодой

Институт прикладной геофизики обладает обширной наблюдательной сетью и составляет прогностическую продукцию по космической погоде в виде среднесрочных (2–5 дней), краткосрочных (сутки) прогнозов, штормовых предупреждений, проводит мониторинг развития состояния космической погоды и возможных возмущений, получает данные о появлении геомагнитных бурь, различных ионосферных возмущений и о появлении солнечных протонов. ИПГ имени Федорова также использует информацию, полученную со спутников других стран-партнеров, состоящих в ISES. На рис. 5 приведен пример снимка, полученного с обсерватория солнечной динамики [2; 4].

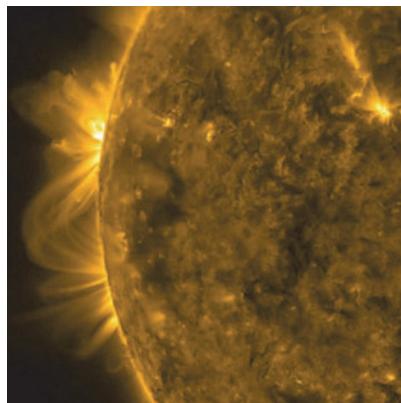


Рис. 5. Пример возмущений на поверхности Солнца, полученные SDO

Помимо вышеперечисленного, в обязанности каждого глобального центра космической погоды входит составление консультативного сообщения (SWX ADVISORY). Консультативные сообщения содержат информацию о превышении степени возмущенности космической погоды через пороговые значения, пространственном распределении опасных гелиогеофизических явлений (ОГЯ) и оценке времени воздействия на атмосферу Земли. Они выпускаются по мере необходимости, но на срок минимум шесть часов и до тех пор, пока возмущение космической погоды не прекратится. Взаимодействие по выпуску и распространению среди авиационных служб сообщений осуществляется совместно всеми глобальными центрами [4].

SWX ADVISORY выпускаются открытым текстом и, согласно нормативным документам ИКАО, с утвержденными сокращениями и цифровыми значениями. Используется максимально сжатый и информативный открытый текст на английском языке. В консультативные сообщения включается одно или несколько из влияний космической погоды на авиацию, приведенные в табл. [4]:

Таблица

*Влияние космической погоды на авиацию,
включаемые в консультативные сообщения SWX ADVISORY*

HF COM	HF communications (propagation absorption)	Высокочастотная (ВЧ/ХФ, high-frequency) связь (распространение, поглощение)
SATCOM	Satellite Communication (propagation absorption)	Спутниковая связь (распространение, поглощение)
GNSS	GNSS-based navigation and surveillance (degradation)	Навигация и наблюдение, основанные на глобальной спутниковой навигационной системе (GNSS, Global Navigation Satellite Systems) (ухудшение характеристик)
RADIATION	Radiation at flight levels (increased exposure)	Радиация на эшелонах полета (повышенный уровень воздействия)

При получении SWX ADVISORY отдел АСПД ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета» обязан передать данные во все филиалы, ГАМЦ, авиационные метеорологические подразделения УГМС для дальнейшего формирования качественной полетной документации и для взаимодействия с органами ЕС ОрВД. Помимо этого, консультативное сообщение заносится на FTP-сервер «Метеоресурс» [4].

Информацию, необходимую для авиации, можно подразделить на несколько фаз. На предполетной фазе информацию о суточном прогнозе космической погоды необходимо предоставить в центр управления полетами (ЦУП). Это данные об уровне солнечной активности, о рентгеновском излучении, о магнитной обстановке, об оптимальных радиочастотах и о прогнозируемых потоках протонов и электронов. С момента взлета самолета и до посадки наблюдаемая информация о состоянии космической погоды должна быть доступна экипажу в режиме реального времени. При внезапном возникновении ОГЯ данные о нем следует незамедлительно сообщать командиру воздушного судна и в ЦУП. После посадки в ЦУП предоставляется анализ космической погоды, полученный при перелете [2].

На рис. 6 приведена схема, составленная Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США (NOAA), демонстрирующая степень влияния космической погоды на воздушное судно при следовании трансполярным маршрутом [2].

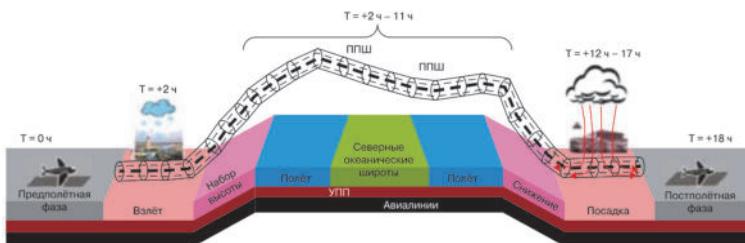


Рис. 6. Схема влияния космической погоды на воздушное судно при следовании трансполярным маршрутом

Для органов метеорологического слежения специалисты Института прикладной геофизики разработали сайт, позволяющий получить доступ к оперативной информации о космической погоде в удобном формате – в виде графиков и таблиц с детальными описаниями. Рассмотрим подробнее предоставленные параметры [6; 8].

1. Степень возмущенности магнитного поля варьируется от штиля до экстремального. При критических значениях влияние магнитного поля распространяется на энергетические системы, – возможны даже повреждения трансформаторов и нестабильность напряжения сетей, – на функционирование спутников, их ориентацию в пространстве. Также данное возмущение космической погоды нарушает высокочастотную и низкочастотную связь.

2. Уровень опасности от потоков энергичных протонов, вызванных солнечными вспышками. При критических значениях возрастает вероятность мощного облучения радиацией экипажа воздушного судна и пассажиров, особенно в высоких широтах. Кроме того, не исключена потеря связи с искусственными спутниками земли, нарушение навигационных систем, зашумленность данных изображений и отсутствие высокочастотной связи в полярных зонах. Пример снимка, иллюстрирующего корональный выброс массы, приведен на рис. 7.

3. Влияние солнечных рентгеновских всплесков на ионосферу Земли может привести к нарушениям низкочастотной радионавигации, обычно используемой на самолетах, к ошибкам при определении положения воздушного судна в системах спутниковой навигации, а также к многочасовому отсутствию связи с летательными аппаратами и к проблемам в использовании высокочастотной связи.

4. Возмущенность космической погоды за последние сутки представлена в виде таблицы с тремя индексами – G, S, R. Эти индексы представляют собой сокращенные названия параметров, представленных на рис. 8.

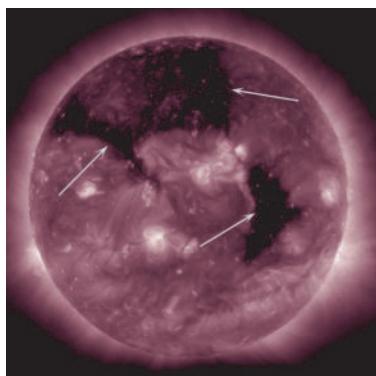


Рис. 7. Снимок SDO, на котором видны корональные дыры на Солнце

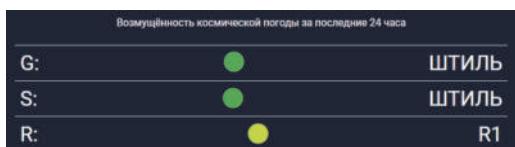


Рис. 8. Возмущенность космической погоды за последние 24 ч

5. Планетарные Кр-индексы проиллюстрированы в виде графика. Они характеризуют отклонение магнитного поля Земли от нормальных значений в течение трех часов и являются показателем геомагнитной активности. На сайте можно посмотреть статистику начиная с 2012 г. по трем пунктам: Кр (GFZ), расчетанный Потсдамским центром наук о Земле, Кр (Moscow) от ФГБУ «ИПГ», Кр (Boulder) от NOAA, NWS. Критическими индексами считаются при достижении их значений 5 и выше.

6. Плотность потока протонов по данным КА GOES также представлена в виде графика и необходима для расчета дозы ионизирующего излучения, которое может накопить бортовая аппаратура, и для расчета дозы облучения экипажа. Плотность потока представлена в мегаэлектронвольт.

7. Поток рентгеновского излучения Солнца показан в четырех вариациях: два значения от геостационарного эксплуатационного спутника наблюдения за окружающей средой (GOES) и два от «Электро-Л», каждое значение иллюстрирует мягкое и жесткое рентгеновское излучение.

8. Потоки частиц по данным КА «Электро-Л» представлены в виде двух графиков. Первый график показывает данные энергии Е_e (электрона) и Е_p (протона) в единицах измерения мегаэлектронвольт начиная со значений более 2 МэВ и 35 МэВ соответственно, второй график – энергию протона. Они нужны для расчета уровня опасности потока частиц, вызванных солнечной вспышкой.

9. Расчет дозы радиации при авиаперелетах позволяет узнать радиационную опасность при введении следующих параметров: даты (доступен архив до 2012 г.), пункта вылета и прилета, высоты и скорости полета и солнечной активности. Пример приведен на рис. 9.

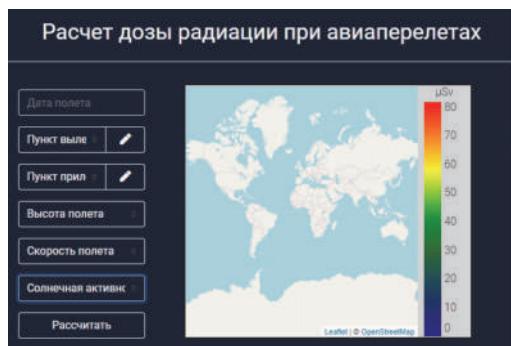


Рис. 9. Расчет дозы радиации при авиаперелетах

Помимо перечисленных данных Институт прикладной геофизики предоставляет доступ к следующим продуктам [6–8]:

- 1) карта распределения мощности дозы от космической радиации;
- 2) последние данные томографии ионосфера над территорией Российской Федерации и не только, так как график распространяется до Греции, Турции, Китая;
- 3) научастинг появления геоэффективных потоков протонов в околоземном пространстве;
- 4) данные радиометров Арктического и антарктического научно-исследовательского института (Санкт-Петербург, Россия);
- 5) данные со спутника SDO (Обсерватории солнечной динамики). Пример такого изображения продемонстрирован на рис. 10.

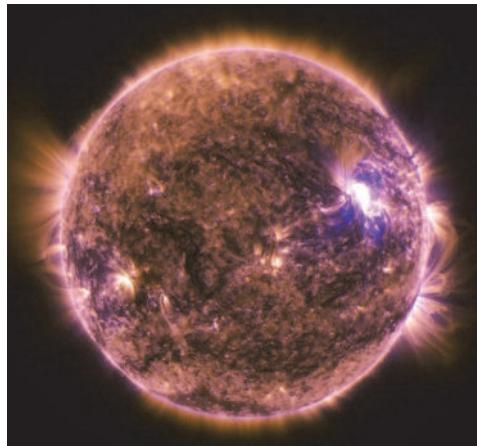


Рис. 10. Снимок с SDO, показывающая солнечную вспышку среднего уровня, класса M7. 9, произошедшую 25 июня 2015 г.

Список литературы

1. Бернгардт О. И. Влияние факторов космической погоды на работу радиосредств // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3.
2. Буров В. А., Латшин В. Б., Сыроежкин А. В. Космическая погода и авиаперевозки // Мир измерений. 2013..
3. Глатов А. Г., Тертышников А. В. Прогнозирование параметров космической погоды на основе данных наземных наблюдений солнечной активности // Гелиогеофизические исследования в Арктике : тр. второй всерос. конф. Мурманск, 24–26 сент. 2018 г. Мурманск, 2018. С. 94–97
4. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Временный инструктивный материал по космической погоде. М., 2019. 61 с.
5. Space Weather Services for Civil Aviation—Challenges and Solutions. User's guide to Space Weather Advisories for Pilots // Kauristie K., Andries J., Beck P., Berdermann J. // Remote Sens. 2021. N 13.
6. Космическая погода сегодня и возможные эффекты. URL: <http://space-weather.ru/#/> (дата обращения 22.09.2022)
7. National Aeronautics and Space Administration (NASA). URL: <https://www.nasa.gov/> (дата обращения 23.09.2022)
8. Space weather prediction center NOAA. URL: <https://www.swpc.noaa.gov/> (дата обращения 24.09.2022)

УДК 504.06

Особенности разработки и согласования планов мероприятий по снижению выбросов при неблагоприятных метеорологических условиях на территории Иркутской области

А. П. Таюрская (ann.tayurskay21@gmail.com), А. М. Кумукова (alinakumukova00@gmail.com)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Обобщена информация о неблагоприятных метеорологических условиях, содержащаяся в нормативных правовых актах Российской Федерации. Представлены данные о планах при неблагоприятных метеорологических условиях, разрабатываемых для объектов негативного воздействия на окружающую среду федерального надзора, расположенных в Иркутской области. Реестр данных планов проанализирован на предмет согласования или отказа Службой государственного экологического надзора Иркутской области. Также рассмотрены сведения о прогнозировании НМУ в городах Иркутской области.

Ключевые слова: неблагоприятные метеорологические условия, объекты негативного воздействия, правовое регулирование.

Введение

Одним из видов воздействия на окружающую среду являются выбросы загрязняющих веществ от источников промышленных предприятий. Загрязнение атмосферного воздуха, создаваемое выбросами предприятий, в большей степени зависит от метеорологических условий и особенностей рельефа: инверсия выше источника или штилевой слой ниже источника, направление ветра, который может перенести примеси со стороны промышленной площадки в жилой, плотно застроенный район. Наступление подобных условий возможно в силу климатических, географических и иных особенностей местности, природных явлений, когда рассеивание примесей загрязняющих веществ в атмосфере находится на низком уровне.

Неблагоприятные метеорологические условия (НМУ) – метеорологические условия, способствующие накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха [3].

Негативное влияние на атмосферный воздух усиливается при наступлении неблагоприятных метеорологических условий. Именно поэтому необходим государственный контроль в этой области.

Порядок разработки планов мероприятий по НМУ регламентируется Федеральным законом от 04.05.1999 № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» и Приказом Минприроды России от 28.11.2019 № 811 «Об утверждении требований к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий [4].

Хозяйствующие субъекты обязаны разрабатывать, согласовывать планы мероприятий при НМУ и организовывать работы по их реализации. Разработка

мероприятий при НМУ осуществляется для всех источников выбросов на объектах негативного воздействия (ОНВ) I, II и III категорий. Для объектов IV категории мероприятия не разрабатываются.

Разработка мероприятий при НМУ проводится на основании: данных документации по инвентаризации стационарных источников, результатов расчета технологических нормативов в части выбросов, нормативов допустимых выбросов, временно согласованных выбросов, результатов расчетов рассеивания выбросов, сведений о результатах государственного мониторинга [4].

Мероприятия при НМУ должны согласовываться с органами, осуществляющими региональный государственный экологический контроль (надзор) – Служба государственного экологического надзора. Эффективность мероприятий оценивается в соответствии с разделом V Методики № 581.

Для организации работ предприятия по реализации мероприятий при НМУ назначается ответственное лицо, отвечающее за получение и передачу в структурные подразделения ОНВ прогнозов о НМУ, а также за реализацию мероприятий при НМУ, в том числе: за получение прогнозов о НМУ; за своевременное выполнение в полном объеме мероприятий при НМУ; за проведение расчетов приземных концентраций загрязняющих веществ и оценку реализации мероприятий при НМУ [4].

При получении прогнозов НМУ хозяйствующие субъекты, имеющие источники выбросов, обязаны проводить мероприятия по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. В приложении приказа № 811 приведен рекомендуемый перечень мероприятий при наступлении НМУ, который подразделяется по отраслям промышленности.

Информация о НМУ представляется территориальным органом Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Существует три степени опасности НМУ. В перечень веществ по конкретному ОНВ включаются загрязняющие вещества [4]:

- 1) расчетные концентрации которых при увеличении на 20 % могут превысить ПДК (с учетом групп суммации);
- 2) расчетные концентрации которых при увеличении на 40 % могут превысить ПДК (с учетом групп суммации);
- 3) расчетные концентрации которых при увеличении на 60 % могут превысить ПДК (с учетом групп суммации).

Мероприятия при НМУ должны обеспечивать снижение приземных концентраций по перечню загрязняющих веществ совместно с другими источниками [4]:

- 1) на 15–20 % при НМУ 1-й степени опасности. Эти мероприятия носят организационно-технический характер, их можно быстро осуществить, они не требуют существенных затрат и не приводят к снижению производительности предприятия.
- 2) на 20–40 % при НМУ 2-й степени опасности. Включают все мероприятия, разработанные для первого режима, а также влияющие на технологические

процессы и сопровождающиеся незначительным снижением производительности предприятия.

3) на 40–60 % при НМУ 3-й степени опасности. Третий режим включает мероприятия, разработанные для первого и второго режимов, а также осуществление которых позволяет снизить выбросы загрязняющих веществ за счет временного сокращения производительности предприятия.

Существуют ОНВ-исключения, деятельность данных объектов связана с обеспечением электрической энергией, газом и паром. Для них устанавливаются такие режимы, которые обеспечивают непрерывность осуществления хозяйственной деятельности, в том числе не допускают введение полного или частичного ограничения режима потребления электрической энергии или понижение температуры теплоносителя, обеспечивающего теплоснабжения населенного пункта в отопительный период. Для таких объектов мероприятия при НМУ должны обеспечивать снижение приземных концентраций:

- 1) до 5–10 % при НМУ 1-й степени опасности;
- 2) до 10–20 % при НМУ 2-й степени опасности;
- 3) до 20–25 % при НМУ 3-й степени опасности.

Для городов с высоким средним уровнем загрязнения наряду с мероприятиями по кратковременному снижению выбросов необходимо разрабатывать перспективные планы мероприятий по достижению критерия качества атмосферного воздуха.

Материалы

Для анализа особенностей разработки и согласования мероприятий при НМУ на территории Иркутской области использовались открытые данные из Государственного доклада, а также данные, предоставленные Службой государственного экологического надзора Иркутской области (Служба) за период с 2020 по сентябрь 2022 г.

Согласно данным Государственного доклада о состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области в 2020 году, уровень загрязнения атмосферного воздуха оценивается как «высокий» и «очень высокий». Это города: Вихоревка, Зима, Свирск, Усолье-Сибирское, Черемхово, Шелехов – с «очень высоким» и города Ангарск, Братск, Иркутск – с «высоким» уровнем загрязнения атмосферного воздуха [1].

Согласно данным Государственного доклада о состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области в 2021 году, уровень загрязнения атмосферного воздуха определен как очень высокий в городах: Братск, Вихоревка, Зима, Свирск, Усолье-Сибирское, Черемхово, Шелехов, а в городах Ангарске, Иркутске, Саянске – как высокий, Байкальске – повышенный. Низким или ориентировочно низким остается уровень загрязнения в населенных пунктах: Бирюсинск, Култук, Листвянка, Мегет, Слюдянка, Тулун, Усть-Илимск [2].

Информация о НМУ в Иркутской области представляется ФГБУ «Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды».

Данные по количеству прогнозируемых НМУ в Государственном докладе о состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области за 2020 год отсутствуют.

В 2021 г. прогнозирование неблагоприятных метеорологических условий осуществлялось для 9 городов области, включая Ангарск, Братск, Зиму, Иркутск, Усолье-Сибирское, Черемхово, Шелехов. В 2021 г. наибольшее количество предупреждений о НМУ было составлено для Братска – 195, наименьшее для Зимы, Саянска и Черемхово – 28. Прогнозы НМУ составляются не для всех городов, в которых отмечается высокое загрязнение атмосферного воздуха [4].

Мероприятия при НМУ в Иркутской области согласовываются со Службой государственного экологического надзора. Согласно Распоряжению № 263ср от 24.08.2020 данной службой утвержден перечень документов, необходимых для рассмотрения и согласования мероприятий по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды НМУ. Перечень содержит данные об объекте ОНВ, а также наименование мероприятия по уменьшению выбросов, величины выбросов до и после мероприятия и достигаемый экологический эффект от мероприятия.

В Иркутской области с 2020 г. по 2022 г. было представлено 552 плана мероприятия при НМУ для объектов, находящихся в ведении федерального надзора. Из них 101 план был составлен для I категории, 219 для II категории и 232 для III категории (рис. 1). Наибольшее количество планов было подано в 2021 г. Разное количество предоставленных планов по категориям ОНВ связано с тем, что большее количество объектов приходится на 3 категорию, а наименьшее на 1 категорию. Однако в 2022 г. видно отклонение этой зависимости по причине того, что на момент анализа данных Службой были рассмотрены не все планы, возможно изменение количества.

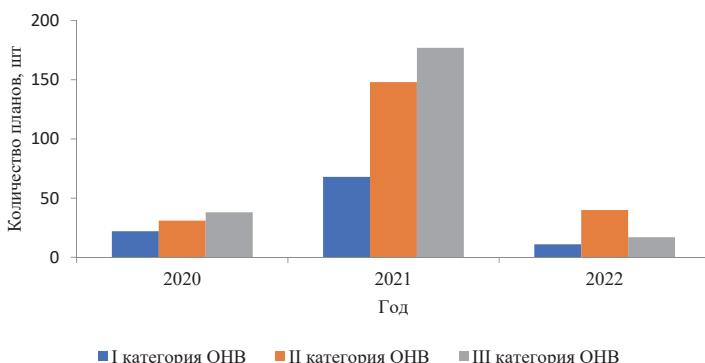


Рис. 1. Распределение планов мероприятий при НМУ по категориям ОНВ за 2020–2022 гг

Объекты, для которых были поданы планы на согласование, относятся к разным отраслям промышленности, распределение по которым представлено на рис. 2.



Рис. 2. Распределение ОНВ, разрабатывающих планы мероприятий при НМУ, по отраслям промышленности за 2020–2022 гг.

Наибольшее количество планов подано для объектов нефтегазовой промышленности и цветной металлургии, а наименьшее для отрасли сельского хозяйства. Категорию «другие» составляют объекты, которые нельзя отнести к конкретной отрасли промышленности, так как вид деятельности указывается по общероссийскому классификатору видов экономической деятельности (ОКВЭД), например, 61.10 деятельность в области связи на базе проводных технологий.

На рис. 3 представлено количество отказов в согласовании планов мероприятий при НМУ по категориям ОНВ. Всего за представленный период зафиксировано 137 отказов в согласовании планов. Наибольшее число отказов в согласовании, как и заявлений, наблюдалось в 2021 г. Причиной отказа является тот факт, что мероприятия при НМУ не обеспечивают снижение создаваемых выбросами источников ОНВ приземных концентраций загрязняющих веществ.

Заключение

В работе представлен обзор нормативной базы при разработке планов НМУ. Разработка основывается на основе прогнозной информации Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. По данным УГМС, в Иркутской области прогнозы НМУ составляются не для всех городов,

в которых отмечается высокое загрязнение атмосферного воздуха. В период с 2020 по 2022 г. из 552 поданных планов в согласовании 137 было отказано, что составляет 25 %. Отказы связаны с тем, что ОНВ не удается обеспечить снижение приземных концентраций загрязняющих веществ, создаваемых выбросами источников. То есть существует проблема эффективности выбранных мероприятий при НМУ.

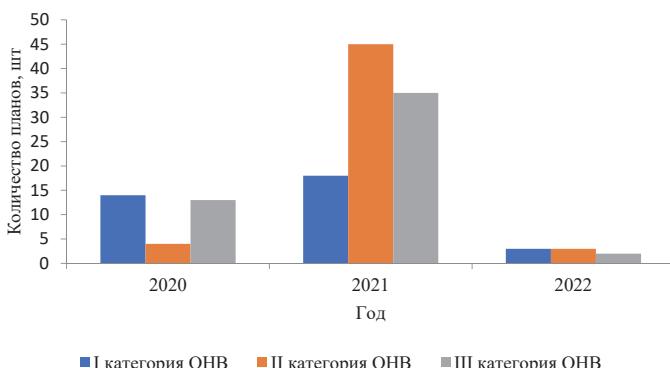


Рис. 3. Количество отказов в согласовании планов мероприятий при за 2020–2022 гг

Мероприятия, отраженные в планах при НМУ, являются одним из механизмов снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха. Так как планы согласовываются с органами исполнительной власти, данной области правового регулирования необходимо уделять особое внимание.

Список литературы

1. Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области в 2020 году. Иркутск : Минприроды Иркутской области, 2021. 331 с
2. Государственный доклад. О состоянии и об охране окружающей среды в Иркутской области в 2021 году. Иркутск: Минприроды Иркутской области, 2022. 252 с.
3. Об охране атмосферного воздуха : фед.закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ (последняя редакция). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
4. Требования к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий : приказ Минприроды РФ от 28.11.2019 № 811. Доступ из справ. -правовой системы «КонсультантПлюс».

Секция 8

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ

УДК 551.510.42

К вопросу о применении глобальных источников информации в гидрологическом моделировании с помощью методов машинного обучения

Д. В. Абрамов (dmbrmv96@gmail.com)¹, Г. В. Айзель (hydrogo@yandex.ru)²

¹Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург

²Потсдамский университет, Потсдам

Аннотация. Представлены результаты моделирования стока на 531 водосборах, расположенных на континентальной территории США. Результаты получены на основе применения модели длинной цепи элементов краткосрочной памяти со статическими параметрами состояний системы (EA-LSTM). Модель EA-LSTM использовала в качестве входных данных глобальные продукты географической информации (HydroATLAS) и сеточной метеорологической информации (ERA5). В противовес этому, в качестве базовых результатов для сравнения выбрана модель, использующая в качестве входных данных региональную географическую базу данных (CAMELS) и региональный сеточный метеорологический продукт (Mauger), полученный по данным наблюдений на метеорологических станциях. Эффективность моделирования стока были оценена с помощью широко известных метрик качества моделирования NSE и KGE качества. Результаты показали, что модель EA-LSTM с использованием глобальных источников информации способна воспроизводить сток на малых и средних водосборах с медианным значением коэффициента NSE 0,47 и KGE 0,58. Модель, использующая региональные данные, достигает более высокой эффективности (KGE, NSE). Предложенный подход имеет высокий потенциал к улучшению результатов моделирования речного стока.

Ключевые слова: гидрологическое моделирование, машинное обучение, метеорологический реанализ, географические базы данных.

Введение

Оценка характеристик речного стока для неосвещенных наблюдениями водосборов является важной научно-практической задачей, решение которой является залогом устойчивого развития водохозяйственного сектора и связанных с ним производственных отраслей. Прогресс в ее решении может быть достигнут благодаря бурному развитию и повышению доступности глобальных баз данных гидрометеорологических и ландшафтных характеристик, а также методов машинного обучения.

В современной гидрологии можно выделить два основных направления разработки гидрологических моделей: традиционный – основанный на физических представлениях о гидрологических процессах, описывающий не только речной сток, но и процессы его формирования в динамике (снегонакопление, испарение, поверхностный перехват влаги и др.), и подход, основанный на построении зависимостей между искомой величиной (расход воды) и данными, на которых эта зависимость строилась (метеорологические величины, данные о ландшафте, морфометрии, климате и т. п.) методами наук о данных, в том числе, машинного обучения.

В работах [1–3] исследователями демонстрируется применимость и эффективность методов машинного обучения для объектов, расположенных на территории США, которые представляются в базе CAMELS [4; 5]. База представляет собой набор метеорологических величин (осадки, температуры, солнечная радиация), физико-географических характеристик (почвенный покров, геологическое строение, морфометрические характеристики и пр.) и гидрологических величин (расходы воды), полученные для водохранилищ, расположенных на континентальной части США. Всего в базе приведены данные по 671 водохранилищу, но из-за недостаточности данных на некоторых из них, в задачах гидрологического моделирования рассматриваются результаты на 531 объекте.

Данные продукта CAMELS представлены только для территории США. Но существующие открытые наборы данных метеорологического реанализа (ERA5) и физико-географических характеристик (HydroATLAS) позволяют получить схожие наборы данных для иных территорий, что открывает возможность для применения базирующихся на этих данных моделей, производить построения, в том числе для России и остального мира.

Для этой цели был разработан и применен алгоритм [6], позволяющий определять физико-географические характеристики водохранилищ из базы данных HydroATLAS, а также скрипт, позволяющий получать осредненные значения метеорологических величин из реанализа ERA5 для водохранилищ.

Полученные данные были использованы в архитектуре EA-LSTM, представленной в работе [3] и получившей медианный коэффициент NSE 0,73 и KGE 0,70. Для реализации модели использовался фреймворк NeuralHydrology [7], основанный на библиотеке глубокого обучения, написанной на языке Python – pytorch. Решение было реализовано в docker контейнере, все результаты и использованный код были собраны в едином репозитории [github](#) для возможности воспроизведения [8].

Модель и данные

Использованная в работе [3] модель EA-LSTM является модификацией классической нейронной сети длинной цепи краткосрочной памяти, с той разницей, что на каждой итерации интерпретация входной метеорологической информации в сток, происходит с учетом обуславливающих данный объект наборов физико-географических характеристик.

В качестве входных параметров данная модель использует суточные данные по максимальной и минимальной температуре, количестве осадков, среднему значению солнечной радиации, среднему давлению водяного пара и набор физико-географических параметров, которые были рассчитаны для водохранилищ отдельно [4; 5]. Все входные метеорологические величины разбивались таким образом, что для предсказания одной величины расхода воды, использовалось 365 их предыдущих значений. Подобное разбиение позволило отразить внутригодовую изменчивость метеорологических условий [9], что в свою очередь позволило интерпретировать внутренние состояния нейронной сети, в контексте их

интерпретации отдельных стокоформирующих процессов. Дополнительная информация, которую давали различные наборы физико-географических параметров, позволяла сети группировать водосборы на схожие по формированию стока группы и благодаря этому получать лучшую сходимость. В качестве функции оптимизации в модели использовался коэффициент Неша – Сатклифа [10].

В процессе калибровки модели были выбраны следующие гиперпараметры, которые показали наилучшие результаты:

- Количество рекуррентных ячеек: 256.
- Коэффициент отсева: 0,40.
- Длина входной последовательности: 365.
- Количество итераций: 30.

Для того проверки применимости глобальных метеорологических и физико-географических данных для решения задач гидрологического моделирования с помощью методов машинного обучения, результат описанной выше модели был выбран в качестве основы, относительно которой будет производиться сравнение. Благодаря функционалу фреймворка NeuralHydrology была построена модель с идентичной архитектурой.

Для получения метеорологических величин были написаны скрипты на языке python, которые позволяют скачивать, обрабатывать и получать осредненные метеорологические характеристики, для водосборов имеющимся в базе CAMELS. Алгоритм расчета подразумевает представление водосбора объекта, как сетки, с разрешением идентичным продукту ERA-5. Затем производится пространственное пересечение каждой ячейки с дальнейшим расчетом площади пересечения. После получения площади рассчитывается «вес» данной ячейки, путем отношения ее площади к площади объекта, к которому она принадлежит. Получив матрицу весов, мы перемножаем ее со значениями исходной матрицы метеорологической характеристики, приведенной из часового формата в суточный. Далее мы, в зависимости от метеорологической характеристики, усредняем или складываем полученные взвешенные ячейки.

Для получения физико-географических величин ранее уже был разработан алгоритм [6], позволяющий получить необходимые величины из глобальной базы HydroATLAS. Алгоритм позволяет получить различные физико-географические параметры водосборов путем пространственного пересечения водосбора объекта исследования и подбассейнов, используемых в базе HydroATLAS. Разделяя атрибуты на качественные и количественные, производятся соответствующие процедуры, подсчитывающие средневзвешенные значения количественных переменных, и модальные значения величин качественных.

Полученные данные полностью повторяют входные параметры, которые используются в работе, использующей CAMELS, что позволяет говорить непосредственно о резонном сравнении непосредственно источников данных и их влиянии на итоговый результат моделирования. Основным драйвером стока, в частности на малых водосборах, являются осадки. Качество реанализа, а именно его синхронность представления реально выпавших дождей, будет напрямую

сказываться на качестве итогового результата моделирования. Несмотря на количество параметров, которые имеет используемая нейронная сеть, основной принцип гидрологического цикла – выпадение осадков – сток, через какое-то время – учитывается.

Для независимости эксперимента результаты эксперимента с моделью [3] были рассчитаны на личном компьютере, и дальнейшая метрика качества, которая берется для сравнения, может быть названа воспроизводимой и независимой. Итоговый набор данных, используемых в эксперименте, покрывает период с 1980 по 2008 г. В качестве промежутка, на котором модель будет тренироваться, послужил диапазон с 1999 по 2008 г. Для валидации предсказаний в процессе обучения был выбран промежуток с 1980 по 1989 г., финальная проверка модели проводилась на промежутке с 1989 по 1999 г. В качестве итоговой метрики качества моделирования был выбран коэффициент Нэша – Сатклифа.

Результаты

На рисунках ниже приводятся пространственные распределения коэффициентов NSE результатов моделирования по различным входным данным: на (рис. 1) коэффициенты NSE при использовании метеорологических и физико-географических данных из базы CAMELS, на (рис. 2) коэффициенты NSE при использовании метеорологических величин ERA-5 и физико-географических данных из базы HydroATLAS.

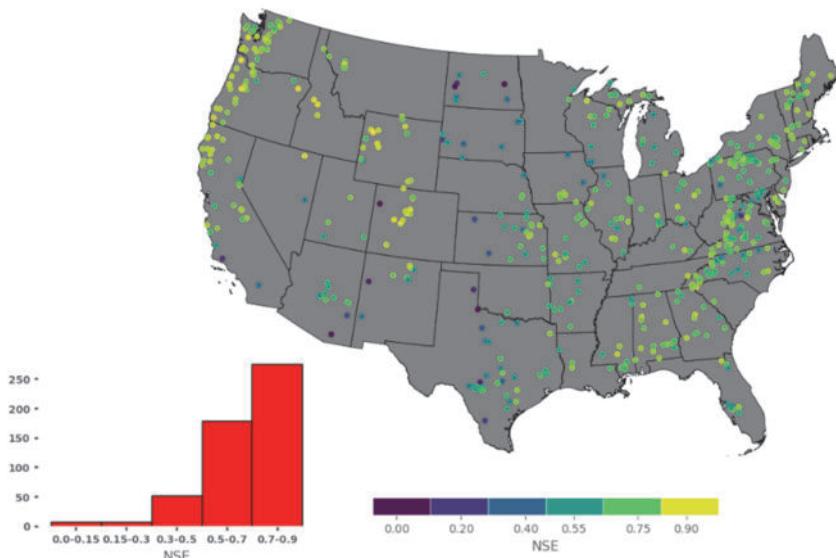


Рис. 1. Коэффициенты NSE при использовании метеорологических и физико-географических данных из базы CAMELS

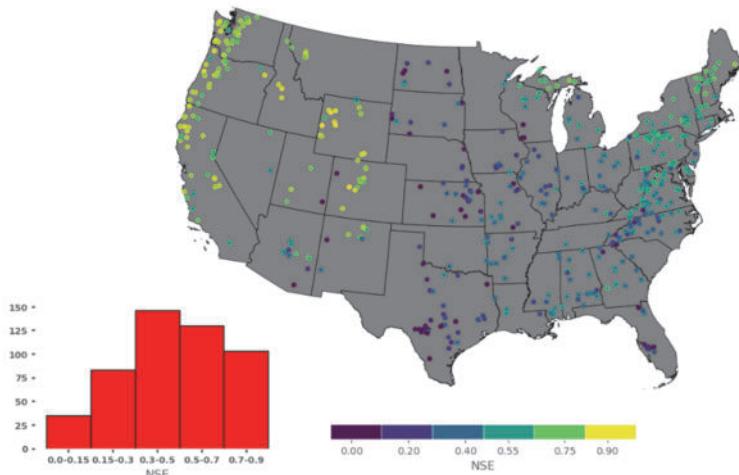


Рис. 2. Коэффициенты NSE при использовании метеорологических величин ERA-5 и физико-географических данных из базы HydroATLAS

Каждой точкой на рисунке отмечается центр водосбора. На гистограммах приводится распределения коэффициентов NSE. По оси 0Х приводятся соответствующие диапазоны, а по оси 0Y – количество объектов, которые попадают в каждый из этих диапазонов.

Цветовая схема отображает градацию качества модели. За «хорошую» принято считать модель, коэффициент NSE которой больше 0,75; удовлетворительной моделью можно называть, где величина $NSE > 0,36$. Все значения, которые ниже – можно относить к неудовлетворительным [11].

Сопоставляя рис. 1 и 2 заметно, что при использовании данных из открытых источников качество моделирования значительно ухудшилось, что подтверждается и падением медианного значения метрики NSE для используемых водосборов с 0,71 до 0,47 и метрики KGE с 0,70 до 0,58. При этом показательно, что ухудшение качества моделирования локализовано только в определенных местах, а не происходит случайным образом по территории региона исследования. Основной величиной, которая влияет на итоговый результат, являются осадки. И если в количественном отношении они не сильно отличаются – средняя разница среднегодовых сумм осадков на 531 объекте – 20 %, то в связности наблюдаются большие сложности. На рис. 3 изображен коэффициент корреляции суточных сумм осадков из набора CAMELS и ERA-5 приведенный для водосборов различной площади. По оси 0Х – отмечается коэффициент парной корреляции, по оси 0Y отмечается количество объектов.

Можно заметить, что на водосборах практически любого размера, коэффициент парной корреляции на большинстве объектов из выбранного площадного диапазона, варьируется от -0,2 до +0,2, что говорит о практически полном отсутствии связности данных.

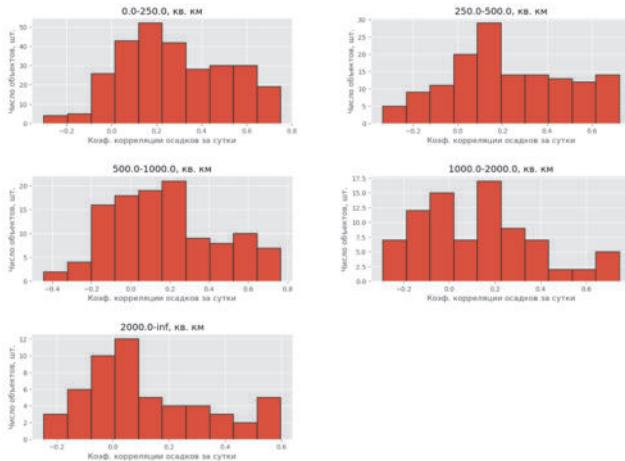


Рис. 3. Коэффициент корреляции суточных сумм осадков из набора CAMELS и ERA-5

На рис. 4 приводится коэффициент корреляции 5-суточных сумм осадков из набора CAMELS и ERA-5 приведенный для водосборов различной площади.

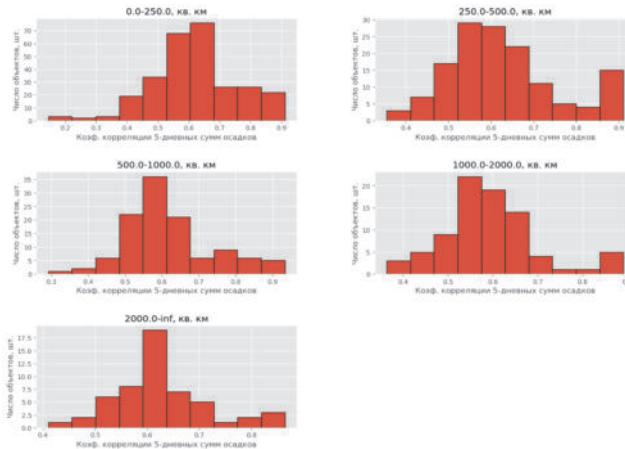


Рис. 4. Коэффициент корреляции 5-суточных сумм осадков из набора CAMELS и ERA-5

При увеличении окна интегрирования наблюдается и увеличение связности данных. На некоторых размерах водосборов подобное сопоставления позволяет получить коэффициенты, приближающиеся к 0,70, что демонстрирует воспроизводимость данных, полученных при составлении набора CAMELS. Вполне возможно, что из-за сложностей построения продукта реанализа, динамики бо-

лее мелких дискретностей не учитывались в достаточной степени, чтобы говорить об отражении реально совершившихся процессов. Соответственно, при увеличении дискретности суммирования и добавления дополнительных предикторов в модель, получаемые ей знания о предыдущих аккумулированных состояниях системы, смогут быть использованы для описания процесса гидрологического стока с лучшим качеством.

Заключение

В результате данной работы можно заключить, о применимости глобальных данных метеорологических и физико-географических характеристик в задачах гидрологического моделирования, с использованием методов машинного обучения. Несмотря на то что качество моделирования значительно сокращается с медианного значения NSE 0,73 до 0,47 и метрики KGE с 0,7 до 0,58, такие направления машинного обучения, как конструирование признаков и ассиляция данных, могут послужить перспективными направлениями, для улучшения качества моделей.

Помимо прочего так же возможно использование других продуктов реанализа, которые качественнее описываются динамику осадков на малых временных промежутках.

Список литературы

1. Feng D., Fang K., Shen C. Enhancing streamflow forecast and extracting insights using long-short-term memory networks with data integration at continental scales // Water Resources Research. 2020. Vol. 56, Iss. 9. <https://doi.org/10.1029/2019WR026793>
2. Machine learning assisted hybrid models can improve streamflow simulation in diverse catchments across the conterminous US / G. Konapala [et al.] // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15, N 10. 104022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba927>
3. Towards learning universal, regional, and local hydrological behaviors via machine learning applied to large-sample datasets / F. Kratzert, D. Klotz, G. Shalev, G. Klambauer, S. Hochreiter, G. Nearing // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2019. Vol. 23, Iss. 12. P. 5089–5110. <https://doi.org/10.5194/hess-23-5089-2019>
4. Development of a large-sample watershed-scale hydrometeorological data set for the contiguous USA: data set characteristics and assessment of regional variability in hydrologic model performance / A. J. Newman [et al.] // HESS. 2015. Vol. 19, Iss. 1. P. 209–223. <https://doi.org/10.5194/hess-19-209-2015>
5. The CAMELS data set: catchment attributes and meteorology for large-sample studies / Addor N., Newman A.J., Mizukami,N., Clark M. P. // HESS. 2017. Vol. 21, Iss. 10. P. 5293–5313. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5293-2017>
6. Abramov D., Ayzel G., Nikitin O. Towards the Unified Approach for Obtaining Hydro-Meteorological and Landscape Characteristics for River Catchments // Short Paper Proceedings of the VI International Conference on Information Technologies and High-Performance Computing – CEUR Workshop-Proceedings. 2021. Vol. 2930, N 6.
7. NeuralHydrology – A Python library for Deep Learning research in hydrology / F. Kratzert [et al.] // Journal of Open Source Software. 2022. Vol. 7 (71). 4050. <https://doi.org/10.21105/joss.04050>
8. GitHub. URL: https://github.com/dmbrmv/ea-lstm_global_parameters (дата обращения: 09.11.2022)
9. NeuralHydrology – Interpreting LSTMs in Hydrology / F. Kratzert [et al.] // Explainable AI: Interpreting, Explaining and Visualizing Deep Learning. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2019. Vol. 11700. https://doi.org/10.1007/978-3-030-28954-6_19
10. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. Vol. 10, Iss. 3. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
11. Suryaningtyas L. S., Ery S., Rispinngatni R. Hydrological Analysis of TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) Data in Lesti Sub Watershed // CIVENSE. 2020. Vol. 3, N 1.12. <https://doi.org/10.21776/ub.civense.2020.00301.3>

УДК 551.501.75

Современные методы автоматизации анализа ветровых характеристик

П. А. Найденов (pavelnaidenov@geogr.isu.ru), Е. Н. Сутырина

(ensut78@gmail.com)

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Приведены результаты технической разработки программного обеспечения для расчета и визуализации современных комбинированных роз ветров с использованием исходных данных из метеорологических архивов сайта гр5.ru. Целью работы явилась алгоритмизация и программная реализация способа выявления закономерностей ветровых характеристик, которые сложно заметить при использовании традиционных методик анализа. Исходным материалом при проведении работы послужили как метеорологические данные из открытой базы сайта гр5.ru. Метод решения поставленных задач – разработка и программная реализация специальных алгоритмов обработки и визуализации метеорологических данных. Основной инструмент разработки – современный высокодоуровневый язык программирования Python и разработанные для него библиотеки общего и специального назначения. Результаты выполненной работы представляют научный и практический интерес с точки зрения возможности широкого применения разработанных методов для глубокого анализа ветровых характеристик для различных территорий и временных отрезков.

Ключевые слова: роза ветров, устойчивость ветра, градация скоростей ветра, язык программирования Python, Windrose, Numpy, Pandas.

Введение

Ветровые характеристики – одни из наиболее важных погодных и климатических факторов. Влияние ветра обязательно должно учитываться при планировании строительных работ различных объектов народного хозяйства, начиная от строений бытового назначения и заканчивая объектами ветровой энергетики, промышленными предприятиями и т. д. В этой связи актуальны программные разработки, позволяющие всесторонне и в автоматизированном режиме изучать ветровые характеристики. Для более глубокого понимания параметров ветра исследователи уже достаточно давно используют розы ветров в комбинированном формате [3–5]. Его преимуществом, по сравнению с традиционным способом построения, является возможность помимо распределения ветра по направлениям показать распределение интервалов скоростей по каждому направлению. Примером достоинства такого способа визуализации является то, что он позволяет повторному взглянуть на характеристику устойчивости ветра.

Построение комбинированных роз ветров (рис. 1) невозможно при помощи традиционных инструментов обработки информации, таких как Excel, Statistica, Surfer или ArcView. Необходимо специальное или собственное программное обеспечение (далее – ПО). Специальное ПО в данной области дорогостоящее и требует длительного изучения. Нами был выбран путь разработки собственного ПО, позволяющего решать именно те задачи по обработке и визуализации метеорологических данных, которые требуется в рамках исследования.

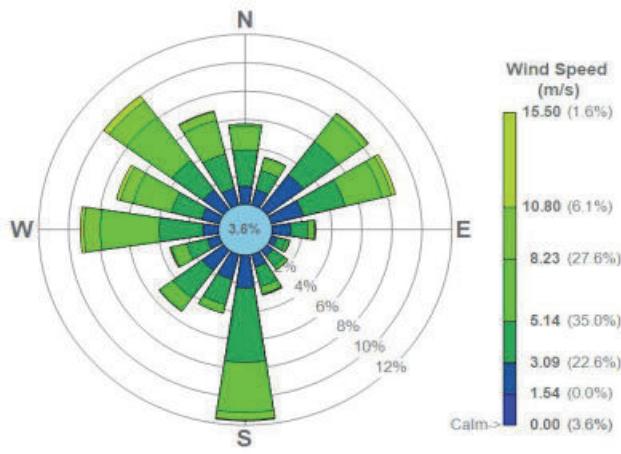


Рис. 1. Пример усовершенствованной комбинированной розы ветров

Научная новизна и практическая значимость работы заключается в следующем. Разработанное авторское ПО позволяет использовать в качестве исходных метеорологические данные из открытых архивов сайта гр5.ru, причем без какой-либо предварительной обработки. Это значительно расширяет возможности анализа, предоставляемые самим сайтом. Любой исследователь может свободно воспользоваться представленными разработками для своего региона и временного отрезка, а также в автоматизированном режиме создать сразу несколько роз ветров и отобразить их на картографической основе. Разработанное в ходе исследования ПО размещено в свободном доступе [2].

Используемые материалы и методы

В рамках проведения работы создана программа на языке Python, которая позволяет построить розу ветров и отобразить информацию по параметру устойчивости ветра на основании скачанного архива погоды на сайте гр5.ru [1]. Именно данный сайт был выбран в качестве источника данных по причине их доступности, широкого территориального охвата и возможности контроля собственных программ путем сверки со статистическими данными сайта.

Программа условно разделена на три логических блока. Первый блок (рис. 2) содержит команды, которые отвечают за открытие скачанного текстового файла (в данном случае это станция Аэропорт Иркутск, данные за год, восьмисрочные наблюдения) и первые необходимые преобразования (замены пустых строк, разбор текста по столбцам и их приведение к соответствующим форматам).

```

1 file = open('30791.11.12.2020.11.12.2021.1.0.0.ru.utf8.00000000.csv', encoding = 'utf-8')
2 lines = file.readlines()
3 lines = [line.replace("\n","") for line in lines]
4 lines = [line.replace("\n;","\n") if line.count(';') > 0 and line.count(';') < 29 else line for line in lines ]
5 lines = [line.replace(';','\n') if line.count(',') > 29 else line for line in lines ]
6 lines = [line.replace(';','\n') if line.count(',') > 29 else line for line in lines ]
7 names = lines[0].split(';')
8 names[0] = 'LT'
9 names = names[-1]
10 formats = ['{}' for i in range(0,len(names),1)]
11 formats[0]='U16'
12 formats[6]='U256'
13 formats[7]='U256'
14 formats[10]='U256'
15 formats[11]='U256'
16 formats[12]='U256'
17 formats[13]='U256'
18 formats[16]='U256'
19 formats[17]='U256'
20 formats[18]='U256'
21 formats[19]='U256'
22 formats[20]='U256'
23 formats[25]='U256'
24 formats[27]='U256'

```

Рис. 2. Первый блок программы

Второй блок программы (рис. 3) отвечает за добавление к полученной таблице дополнительных столбцов, данные в которых соответствуют требованиям дальнейших вычислений и преобразований. На данном этапе в алгоритм уже вводятся функции библиотеки NumPy. В частности, метод np.appendatay [6] резервирует в памяти компьютера массив-маску, не внося изменения в изначальные данные. Такая возможность языка Python дает преимущество, которое заключается в том, что можно алгоритмизировать создание любого количества промежуточных данных, при этом не испытывая необходимости создавать их физически на жестком диске.

```

1 import numpy as np
2 from numpy.lib.recfunctions import append_fields
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 dtype = np.dtype([('names':names,'formats':formats)])
6 rawdata = np.genfromtxt([lines,dtype=dtype,delimiter=';',skip_header=7])
7 dates = np.asarray([stamp.replace(' ','_') for stamp in rawdata['LT']])
8 dates = np.asarray([np.datetime64(stamp[0:10]+'-'+stamp[3:5]+'-'+stamp[0:2]+Y+stamp[11:17]) for stamp in dates])
9 data = append_fields(rawdata,'date',dates)
10
11 winds8 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с севера','0') for stamp in rawdata['00']])
12 winds1 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с северо-востока','22.5') for stamp in winds8])
13 winds2 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с северо-востока','45') for stamp in winds1])
14 winds3 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с востоко-северо-востока','67.5') for stamp in winds2])
15 winds4 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с востоко-востока','90') for stamp in winds3])
16 winds5 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с востоко-юго-востока','112.5') for stamp in winds4])
17 winds6 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с юго-востока','135') for stamp in winds5])
18 winds7 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с юго-юго-востока','157.5') for stamp in winds6])
19 winds8 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с юга','180') for stamp in winds7])
20 winds9 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с юго-запада','202.5') for stamp in winds8])
21 winds10 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с юго-запада','225') for stamp in winds9])
22 winds11 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с западо-юго-запада','247.5') for stamp in winds10])
23 winds12 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с запада','270') for stamp in winds11])
24 winds13 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с западо-северо-запада','292.5') for stamp in winds12])
25 winds14 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с северо-запада','315') for stamp in winds13])
26 winds15 = np.asarray([stamp.replace('Ветер, дунув с северо-северо-запада','337.5') for stamp in winds14])
27 winds = np.asarray([stamp.replace('Янтарь, безветрие','480') for stamp in winds15])
28
29 data1 = append_fields(data,['winddirs'],np.float64(winds))
30
31 windspeed = np.asarray(rawdata['FF'])
32
33 data2 = append_fields(data1,'windspeed',np.float64(windspeed))
34
35 calm = 0
36 for i in range(len(data2)):
37     if data2['windspeed'][i] == 0:
38         calm += 1

```

Рис. 3. Второй блок программы

Третий блок программы (рис. 4) отвечает за непосредственную визуализацию ранее подготовленных данных в виде розы ветров с градациями по скорости по каждому направлению. Для построения комбинированной розы ветров был применен пакет windrose (строка 1) [9] для языка Python. Работа данного пакета во много основана на функциях библиотеки matplotlib (строка 2) [10]. Кроме того, в этом блоке проводятся расчеты по устойчивости ветра и по доле штилевых ситуаций. Для этого применяются функции библиотек statistics [7] и math [8].

```

1 from windrose import WindroseAxes
2 from matplotlib import pyplot as plt
3 import statistics
4 import math
5
6 fig = plt.figure(figsize=(14,10))
7 rect = [0.1, 0.1, 0.8, 0.8]
8 hist_ax = plt.Axes(fig,rect)
9 hist_ax.bar(np.array([1]), np.array([1]))
10
11
12 ws = data2['windspeed']
13 wd = data2['winddirs']
14
15 u = []
16 v = []
17 for i in range(len(data2)):
18     u.append(-data2['windspeed'][i] * np.sin(math.radians(data2['winddirs'][i])))
19     v.append(-data2['windspeed'][i] * np.cos(math.radians(data2['winddirs'][i])))
20
21 ust = pow(pow(statistics.mean(u),2) + pow(statistics.mean(v),2),1/2) / statistics.mean(data2['windspeed'])
22
23
24 ax = WindroseAxes.from_ax()
25 ax.bar(ws, ws, normed=True, opening=0.8, edgecolor='black', nsector=16, bins=np.arange(0, max(ws), 2))
26 ax.set_legend(loc='upper right', bbox_to_anchor=(1.11, 1.11), units='WC',
27             title='Повторяемость \n штилей - ' + str(round(calm/len(data2)*100, 1)) + '%\n\n'
28             + 'Устойчивость \n ветра = ' + str(round(ust,2)))
29
30 ax.set_theta_zero_location('E')
31 ax.set_theta_direction('anticlockwise')
32 ax.set_xticklabels(['B', 'CB', 'C', 'C3', '3', 'B3', '10', 'B8'])
33
34 ax.set_rmax(20)
35 ax.set_rticks([5, 10, 15, 20])
36 ax.set_yticklabels(['5%', '10%', '15%', '20%'], position=(0,0))
37 plt.title('Роза ветров для станции Аэропорт Иркутск \n 11.12.2020 - 11.12.2021', y=1.08)
38
39 plt.show()
```

Рис. 4. Третий блок программы

Полученные результаты

Ветер оказывает существенное влияние на народное хозяйство как в масштабах погоды, так и в масштабах климата. Глубокое и всестороннее изучение этого явления требует привлечения современных технических и программных средств. В работе было продемонстрировано, что высокоуровневый язык программирования Python, при использовании дополнительных библиотек общего и специального назначения, позволяет успешно вести необходимые расчеты и реализовывать сложную визуализацию комбинированных роз ветров.

В целом проделанная работа по написанию собственного ПО, позволяющего анализировать метеорологические данные скачанных архивов сайта гр5.ru, оправдала предъявляемые требования, а именно: возможность строить сразу несколько роз ветров с целью их visualного сравнения (рис. 5); отображение информации на картографической основе для эффективного проведения пространственного анализа ветровых характеристик (рис. 6).

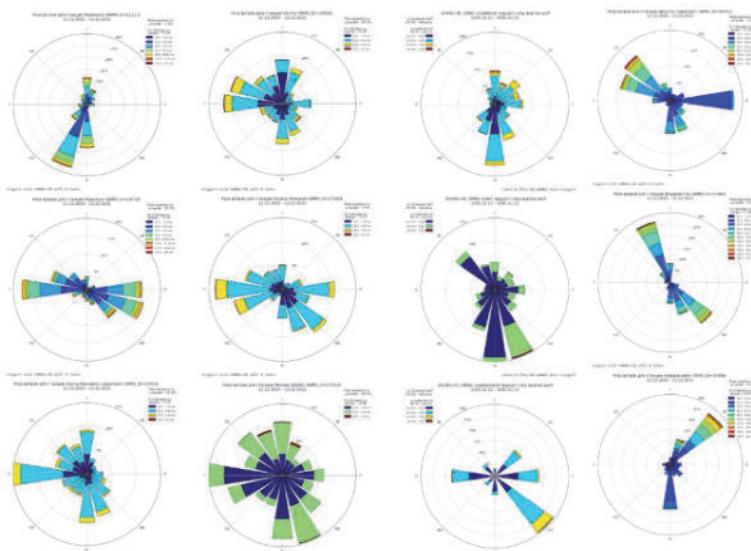


Рис. 5. Результат работы алгоритма по одновременному получению нескольких роз ветров. Станции слева направо и сверху вниз:
Мурманск, Норильск, Ханты-Мансийск (аэропорт), Якутск,
Казань-Опорная, Москва (ВДНХ), Челябинск, Томск, Новосибирск, Иркутск (аэропорт),
Владивосток, Новороссийск



Рис. 6. Результат работы алгоритма, реализующего отображение роз ветров на картографической основе

Заключение

В ходе выполнения представленной работы были достигнуты следующие результаты:

1. Проведен обзор традиционных и современных методов анализа ветровых характеристик.
2. Освоена методика построения усовершенствованных комбинированных роз ветров с помощью языка программирования Python и библиотеки Windrose.
3. Разработаны и реализованы в виде компьютерной программы собственные алгоритмы обработки и визуализации данных из общедоступных архивов сайта rp5.ru, без предварительной обработки.
4. Выявлено и решено множество технических и алгоритмических проблем, связанных с обработкой не подготовленных предварительно метеорологических данных из указанного открытого источника.
5. Реализованы возможности построения сразу нескольких роз ветров и размещения их на картографической основе. Это позволило выявить некоторые особенности географического распределения параметров ветра в нашей стране, заметить которые можно только с применением усовершенствованных комбинированных роз ветров.

Список литературы

1. Расписание погоды: официальный сайт. – URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 30.05.2022).
2. Финальная версия кода разработанного программного обеспечения // Google Disk. – URL: <https://clck.ru/rb8ay> (дата обращения: 30.05.2022).
3. The Regional Nature of PM2.5 Episodes in the Upper Ohio River Valley / Anderson R. R. [et al.] // Journal of the Air & Waste Management Association. 2004. Vol. 54, N 8. P. 971–984.
4. Obolkin V.A., Potemkin V. L., Makuhin V. L. Low-level atmospheric jets as main mechanism of longrange transport of power plant plumes in the Lake Baikal Region // International Journal of Environmental Studies. 2014. N 6. P. 1–7.
5. Identification of PM2.5 Sources Affecting a Semi-Arid Coastal Region Using a Chemical Mass Balance Model / Subramoney P. [et al.] // Aerosol and Air Quality Research. 2013. N 13. P. 60–71.
6. NumPy.asarray // NumPy v1.22 Manual. URL: <https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.asarray.html> (дата обращения: 30.05.2022).
7. Python Math – Mathematical functions // Python 3.10.1 documentation. URL: <https://docs.python.org/3/library/math.html> (дата обращения: 30.05.2022).
8. Python Statistics – Mathematical statistics functions // Python 3.10.1 documentation. URL: <https://docs.python.org/3/library/statistics.html> (дата обращения: 30.05.2022).
9. Python Windrose package notebook example // Readthedocs. URL: <https://windrose.readthedocs.io/en/latest/usage.html> (дата обращения: 30.05.2022).
10. Visualization with Python // Matplotlib. URL: <https://matplotlib.org> (дата обращения: 30.05.2022).

УДК 519.688:551.509.51

О быстродействии расчетов модели WRF–ARW на кластере CRAY

С. О. Романский (khvstas@gmail.com), Е. М. Вербицкая (werbaem@gmail.com)

Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Владивосток

Аннотация. Представлено сравнение быстродействия расчетов модели Weather Research and Forecasting (WRF) с динамическим ядром Advanced Research WRF (ARW), выполненных на сетках, включающих 540×540 узлов, с горизонтальными шагами 1, 3 и 5 км и 51 уровнем по вертикали для различного числа вычислительных узлов высокопроизводительного вычислительного кластера CRAY XC-40. Расчеты выполнялись на 24 ч вперед при стандартном наборе параметризаций физических процессов. Полученные оценки быстродействия (время расчета, коэффициент ускорения, эффективность и др.) показывают хорошие результаты работы модели в параллельном режиме при выборе размера и шага сетки соответственно количеству задействованных вычислительных узлов кластера. Так для всех проведенных вариантов эксперимента значения эффективности не опускались ниже 0,90.

Ключевые слова: численный прогноз погоды, параллельные вычисления, модель WRF.

Введение

Современные технологии производства оперативных численных прогнозов погоды требуют использования высокопроизводительной вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения для достаточного ускорения параллельных расчетов с целью достижения минимального необходимого времени счета модели. Очевидно, что с возрастанием времени счета численной модели снижается заблаговременность оперативного прогноза. При этом для прогнозирования опасных явлений погоды, которые часто имеют мезомасштабный характер, необходимо использовать современные численные негидростатические модели прогноза погоды, расчеты которых необходимо выполнять на сетках с большим количеством вертикальных уровней и малыми шагами по горизонтали, что приводит к увеличению времени подготовки прогноза.

В ведущих метеорологических центрах, как правило, имеется парк высокопроизводительной вычислительной техники необходимой для расчета моделей прогноза погоды, как глобального, так и регионального охвата. Например, в США применяется региональная прогностическая система The High-Resolution Rapid Refresh [2] на основе негидростатической модели Weather Research and Forecasting (WRF) [4] с расчетным ядром Advanced Research WRF (ARW) [6]. Собственно численная модель WRF–ARW подходит как для научных расчетов, так и оперативного прогнозирования. Она развивается рядом организаций в США: Национальными центрами предсказания состояния окружающей среды (National Centers for Environmental Prediction), Национальным центром исследований атмосферы (National Center for Atmospheric Research) и другими.

Указанная модель распространяется в исходных кодах, что позволяет откомпилировать ее в соответствии с особенности вычислительной техники, на которой ее планируется применять. В состав модели WRF–ARW входит большое количество параметризаций для описания различных процессов: микрофизических, радиационных, процессов в почве, в приземном и пограничном слоях атмосферы и других.

Для распараллеливания модели используются библиотеки параллельного программирования OpenMP и MPI.

Целью исследования является анализ быстродействия вычислительного процесса численного интегрирования модели WRF–ARW при различных конфигурациях сеточной области высокого пространственного разрешения (варьируются шаг сетки по горизонтали и шаг по времени) на высокопроизводительном вычислительном кластере CRAY XC-40, установленном в региональном вычислительном центре ФГБУ «Дальневосточное УГМС».

Кластер CRAY XC-40 пиковой производительностью 76 ТФлопс построен на основе 18-ядерных процессоров Intel Broadwell с тактовой частотой 2,3 ГГц. Один вычислительный узел кластера включает два процессора. Необходимо отметить, что на этом вычислителе развернута оперативная система численных прогнозов погоды для Восточной Сибири и Дальнего Востока России [1; 5], поэтому для тестирования было задействовано не максимальное возможное количество вычислительных узлов кластера.

Описание вычислительного эксперимента

Оценка быстродействия процесса численного интегрирования выполнялась по версии модели WRF–ARW 3.9 [7] и проводилась для следующих конфигураций области расчета: по вертикали от уровня земли и до изобарической поверхности 50 гПа была задана неравномерная сетка, состоящая из 51 уровня, с наиболее подробным разрешением в нижнем двухкилометровом слое; уровни по вертикали задавались с использованием вертикальной координаты η ; горизонтальная область расчета представляет собой квадрат со стороной, включающей $n = 540$ сеточных узлов. Тестировались конфигурации модели с шагами по горизонтали: 1, 3 и 5 км, которым соответствовали следующие шаги по времени: 6, 18 и 30 с.

Вычисления проводились на 24 ч вперед в конфигурации со стандартным набором параметризаций: для описания микрофизических процессов использовалась схема WSM6; процессы длинноволновой и коротковолновой радиации рассчитывались параметризациями из семейства RRTMG; процессы в почве – схема Noah; процессы в приземном и пограничном слоях – схемы MM5 и Yonsei. Параметризация конвекции в виде малых шагов по горизонтали не применялась.

Данные на границах области расчета обновлялись каждые 6 ч. Начальные и граничные данные для каждого рассматриваемого варианта модели были подготовлены заранее, поэтому для оценки быстродействия учитывалось только собственное время работы модели (программа wrf.exe). Постпроцессинг для модели WRF–ARW не использовался.

Модель WRF–ARW была скомпилирована и слинкована с использованием компиляторов фирмы Intel на кластере CRAY XC–40 с использованием общей и разделенной памяти. Запуск модели выполнялся через очередь задач, все задания запускались со стандартным приоритетом.

Характеристики оценки быстродействия и эффективности расчета программ в параллельном режиме

Замерялось только время работы модели WRF–ARW (программа wrf.exe) для различного числа узлов вычислительного кластера CRAY XC–40.

Рассчитывались следующие характеристики:

- коэффициент ускорения: $S_p = T_1 \cdot T_p^{-1}$ – отношение времени счета модели на одном (T_1) и на нескольких вычислительных узлах (T_p);
- эффективность [3]: $E_p = S_p \cdot p^{-1}$ – отношение коэффициента ускорения к числу задействованных вычислительных узлов (p); при коэффициенте ускорения равном p эффективность составляет единицу;
- стоимость расчета: $C_p = p \cdot T_p$ – суммарное машинное время работы задействованных для текущего расчета вычислительных узлов;
- суммарное для всех вычислительных узлов время, затрачиваемое на накладные расходы, связанные с организацией параллельных вычислений [3]: $T_0 = p \cdot T_p - T_1$.

Результаты вычислительного эксперимента

Для каждого из рассматриваемых горизонтальных шагов сетки расчеты модели проводились на 1–25 вычислительных узлах кластера. Замеры времени работы для оценки быстродействия программы wrf.exe для каждого из тестируемых вариантов получены из протоколов очереди задач. Остальные оценки быстродействия и эффективности работы модели в параллельном режиме являются расчетными. Результаты вычислительного эксперимента для удобства анализа сведены в таблицу и сгруппированы по конфигурациям области расчета модели.

Обсуждение и выводы

По данным табл. время расчета программы wrf.exe уменьшается с ростом числа вычислительных узлов для всех вариантов эксперимента. Значения коэффициента ускорения близки к числу задействованных вычислительных узлов, и для всех задач фиксированной размерности сохраняется возрастание коэффициента ускорения с ростом p , что указывает на сильную масштабируемость параллельного алгоритма, реализованного в модели WRF–ARW. При этом коэффициент ускорения для фиксированного количества узлов в целом выше для расчетных сеток с более мелким горизонтальным шагом, что объясняется наибольшим количеством проводимых вычислений вследствие более маленького шага по времени.

Таблица

Оценки быстродействия программы «wrf.exe» при расчете в параллельном режиме для различного количества вычислительных узлов кластера CRAY XC-40

Шаг, км	Вычислительные узлы, p	Время счета, T_p , мин	Коэффициент ускорения, S_p	Эффективность, E_p	Стоимость расчета, C_p , мин	Накладные расходы, T_0 , мин
1	1	858	1	1	858	0
	3	287	2,99	1,00	861	3
	5	172	4,99	1,00	860	2
	8	108	7,94	0,99	864	6
	10	86	9,98	1,00	860	2
	12	72	11,92	0,99	864	6
	15	58	14,79	0,99	870	12
	20	43	19,95	1,00	860	2
	25	35	24,51	0,98	875	17
3	1	519	1	1	519	0
	3	178	2,92	0,97	534	15
	5	107	4,85	0,97	535	16
	8	67	7,75	0,97	536	17
	10	54	9,61	0,96	540	21
	12	45	11,53	0,96	540	21
	15	36	14,42	0,96	540	21
	20	27	19,22	0,96	540	21
	25	22	23,59	0,94	550	31
5	1	407	1	1	407	0
	3	136	2,99	1,00	408	1
	5	82	4,96	0,99	410	3
	8	52	7,83	0,98	416	9
	10	43	9,47	0,95	430	23
	12	36	11,31	0,94	432	25
	15	29	14,03	0,94	435	28
	20	22	18,50	0,93	440	33
	25	18	22,61	0,90	450	43

Для каждого варианта стоимость расчета находится примерно на одном уровне. Наибольшая вариативность (в пределах 10 %) этой характеристики приходится на сетку с шагом 5 км. Для сеток с горизонтальными шагами 1 и 3 км колебания значений стоимости расчета значительно меньше, чем для 5 км. Это указывает на низкие накладные расходы, связанные с организацией параллельных вычислений и подтверждается результатами табл.: например, для модели, рассчитываемой на сетке с шагом 5 км при использовании 25 вычислительных узлов, в среднем на каждый узел приходится менее 2 мин машинного времени, расходуемых на накладные расходы. Отметим, что уменьшение значений стоимости расчета с увеличением количества вычислительных узлов, например, для случая шага сетки 1 км и 8–10 вычислительных узлов объясняется округлением, так как в таблице время расчета приводится в целых минутах.

Для всех проведенных вариантов эксперимента значения эффективности не опускались ниже 0,90, что является хорошим результатом и предполагает, что

ускорение будет достигать высоких значений и для расчетов модели на рассматриваемых сетках при количестве вычислительных узлов более 25. Наилучшую эффективность при использовании более 10 вычислительных узлов, очевидно, показывает конфигурация модели с наибольшим объемом вычислений, т. е. расчеты на сетке с шагом 1 км: эффективность достигает порядка 0,98–0,99.

Для приведенных вариантов расчета фиксированной размерности можно полагать, что при выпуске краткосрочного прогноза погоды на 72 ч и длительности оперативного расчета порядка 1 ч, для сетки модели с горизонтальным шагом 5 км достаточно задействовать не менее 20 узлов кластера, для 1 и 3 км – не менее 25.

Приблизительную оценку времени расчета модели WRF–ARW на некоторой сетке, состоящей из $d \times b$ узлов, при известном времени счета T_p на сетке из $n \times n$ узлов с теми же шагами по времени и пространству можно получить по формуле $T'_p \approx d \cdot b \cdot n^{-2} \cdot T_p$. Такая оценка, при переходе к новой конфигурации, не учитывает изменение времени, затрачиваемого на накладные расходы. Например, для сетки из 1080×1080 узлов с шагом по горизонтали 1 км при расчете на 24 ч вперед на 25 вычислительных узлах получено время счета 145 мин при теоретической оценке $T'_{25} \approx 140$ мин (по данным табл.).

В представленной формуле дополнительно можно учесть изменения шага по времени и количества вертикальных уровней, но погрешность такой оценки станет существенно выше. Для этого, необходимо домножить правую часть соотношения для расчета T'_p на два коэффициента:

- для учета изменения шага по времени: $k_\tau = \tau \cdot \tau'^{-1}$, где τ – шаг по времени для известного T_p , τ' – новый шаг по времени;
- для учета изменения количества вертикальных уровней: $k_l = l' \cdot l^{-1}$, где l – количество уровней для известного T_p , l' – новое количество вертикальных уровней;

Список литературы

1. Вербицкая Е.М. Система численного прогноза погоды специализированного метеорологического центра в Хабаровске, перспективы развития и совершенствования // Труды ДВНИГМИ. 2021. Вып. 156. С. 57–72.
2. A North American hourly assimilation and model forecast / Benjamin S. G. [et al.] // Mon. Wea. Rev. 2016. Vol. 144, N 4. P. 1669–1694.
3. Grama A. Y., Gupta A., Kumar V. Isoefficiency: measuring the scalability of parallel algorithms and architectures // IEEE parallel & distributed technology. 1993. N 3. P. 12–21.
4. Power J.G., Klemp J.B., Skamarock W.C. The weather research and forecasting model: overview, system efforts, and future directions // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2017. V. 98. P. 1717–1737.
5. Romanskiy S., Verbitskaya E. New operational short-range numerical weather prediction system of Khabarovsk regional specialized meteorological center // Proc. of the V international conference on information technologies and high-performance computing (ITHPC-2019), Khabarovsk, Russia, September 16–19, 2019. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2426/paper11.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).
6. A description of the Advanced research WRF version 3 (NCAR/TN-475+STR) / Skamarock W.C. [et al.]. NCAR, 2008. 125 p.
7. WRF-ARW user's guide v.3.9. URL: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/user_guide_V3.9/contents.html (дата обращения: 07.10.2022).

УДК 551.510.42

Возможности геоинформационной системы «Арктика-М» для решения задач оперативной метеорологии

Е. И. Холодов (e.kholodov@dvrcpod.ru), А. Н. Давиденко
(a.davidenko@dvrcpod.ru), А. А. Киселев (vppi21@dvrcpod.ru)

Дальневосточный центр ФГБУ «Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета», Хабаровск

Аннотация. Рассмотрены возможности геоинформационной системы «Арктика-М», разработанной в Дальневосточном центре НИЦ «Планета» в интересах широкого круга потребителей. Представлены структура системы, основные инструменты комплексирования и анализа спутниковой и другой информации метеорологического назначения. Продемонстрированы возможности использования геоинформационной системы «Арктика-М» на примерах анализа мезомасштабного циклогенеза в Арктических морях и выявления конвективных явлений в облачности по данным российского гидрометеорологического космического аппарата Арктика-М № 1. Показано, что возможность проведения такого анализа в режиме реального времени вносит неоценимый вклад в решение задач мониторинга и изучения синоптических процессов.

Ключевые слова: Арктика-М № 1, геоинформационная система, метеорологическая информация, полярный мезомасштабный циклон.

Введение

Одна из важнейших задач дальнейшего развития отечественных космических систем дистанционного зондирования Земли гидрометеорологического назначения связана с обеспечением оперативной передачи и отображением часто обновляемой информации удаленным пользователям. Для оптимального использования такой информации требуются инструменты, позволяющие путем выполнения минимального количества операций обеспечить оперативную и наглядную визуализацию спутниковых продуктов с возможностью наложения на них различных синхронных данных из других источников для совместного анализа. Особое значение подобные инструменты приобретают для Арктического региона и северных территорий Земли, где отсутствие достаточного количества метеорологической информации является серьезной проблемой при прогнозировании погоды.

28 февраля 2021 г. на высокоэллиптическую орбиту Земли был запущен гидрометеорологический космический аппарат (КА) Арктика-М № 1, бортовая целевая аппаратура которого позволяет обеспечивать съемку Арктического региона Земли с периодичностью 15 (учащенный режим) или 30 мин для получения информации метеорологического и гидрологического назначения, как днем, так и ночью.

Получение информации с КА Арктика-М № 1 впервые в мире позволило проводить оперативный полномасштабный мониторинг приполярных районов севернее 60° с. ш. и морей Северного Ледовитого океана. Этот регион Земли недоступен для наблюдения со спутников на геостационарной орбите, а низкоор-

битальные метеорологические спутники не обеспечивают наблюдение высоколатитудных районов с требуемой периодичностью. Международное научное сообщество оценило запуск КА Арктика-М № 1 как пионерский успех мирового уровня [1].

В связи с повышенным интересом специалистов гидрометеорологических служб, авиационных метеорологов и других заинтересованных лиц к целевой информации, поступающей с КА Арктика-М № 1, а также учитывая предстоящее увеличение группировки аппаратов этой серии, стояла задача создания информационной платформы, обеспечивающей доступ к данным и результатам их тематической обработки в едином формате и в режиме реального времени. Специалистами Дальневосточного центра НИЦ «Планета» разработана геоинформационная система (ГИС) «Арктика-М» с использованием современных технологий, обеспечивающих доступ к данным посредством картографических сервисов, объединенных в веб-интерфейсе. Серверная часть ГИС состоит из ПО GeoServer, СУБД PostgreSQL и исполняемых скриптов, разработанных авторами. Лицензии на все стороннее ПО не накладывают ограничений на использование или распространение готовой ГИС в широком доступе.

Структура системы ГИС «Арктика-М»

Геоинформационная система «Арктика-М» состоит из трех основных компонент, тесно связанных между собой: системы подготовки данных, базы данных хранения векторной и растровой информации и системы визуализации и распространения информации.

Система подготовки данных представляет собой комплекс, состоящий из автоматизированных модулей, обеспечивающих сбор информации:

- из системы архивации и каталогизации спутниковых данных НИЦ «Планета»;
- из базы данных гидродинамической модели регионального прогноза (ГМРП) Гидрометцентра России;
- из глобальной системы численного прогнозирования погоды (GFS) Национальной метеорологической службы США (NWS);
- с сети датчиков грозорегистрационной системы Росгидромета, развернутой в Европейской части страны и на Дальнем Востоке.

Помимо функции сбора разнородной информации комплекс осуществляет ее дополнительную подготовку. Данные ДЗЗ и ЧПП в автоматическом режиме подготавливаются в виде файлов в форматах GeoTiff и HDF5. Для совмещения времени спутниковой съемки и данных прогностических моделей применяется интерполяция по времени с использованием технологии компьютерного зрения, а именно оптического потока [3]. На основе применения сверточных нейронных сетей, выполняется проверка на соответствие пикселей спутникового изображения классам облачности или подстилающей поверхности и формирование на основе ее так называемых масок [2]. Для обработки и обмена данными используются модули, написанные на Python и C#.

В качестве базы данных хранения используется СУБД PostgreSQL с расширением PostGIS (для работы с векторной информацией). Вся векторная информация хранится непосредственно в базе данных, для растровой информации в базе размещается атрибутивная информация, а сами данные содержатся на отдельной выделенной системе хранения.

Система визуализации и распространения информации состоит из веб-интерфейса и сервера предоставления картографических данных. В качестве серверной части используется программное обеспечение с открытым исходным кодом GeoServer [5], на котором реализовано более 14 картографических сервисов различной тематической информации. Веб-интерфейс позволяет объединить картографические сервисы, наполняемые из разнородных источников, обеспечивая возможность визуализации и анализа обстановки как в целом на карте, так и для точки. Реализация с использованием картографического приложения OpenLayers [6] позволяет максимально полно задействовать возможности GeoServer. Пользователю предоставляются удобные средства навигации в картографическом окне, изменения масштабов, выбора требуемых географических регионов. Отображение информации осуществляется в виде накладывающихся (совмещенных) информационных слоев, выбираемых пользователем. Слои объединены в тематические группы: спутниковые изображения, прогностическая информация, данные грозорегистрации, атрибутивные данные (рис. 1). Большинство информационных слоев помимо пространственной имеет временную привязку, в связи с чем, в ГИС «Арктика-М» реализованы механизмы организации запросов к этим слоям с учетом временных критериев. Атрибутивная информация в части отображения городов и объектов гидрологии суши формируется по запросам региональных пользователей в зависимости от решаемых задач.

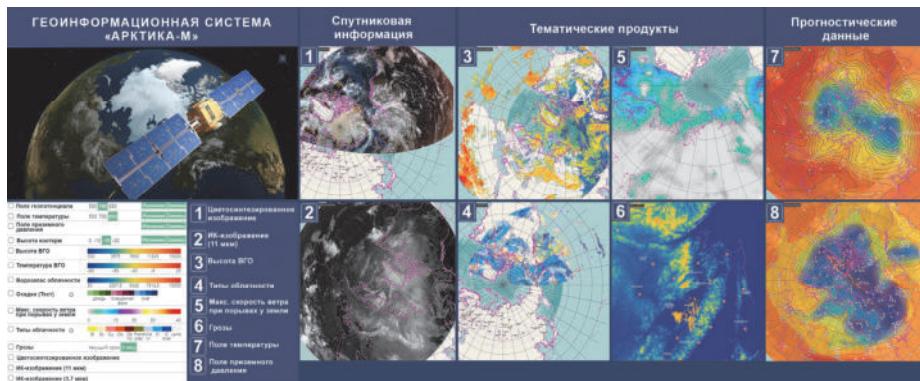


Рис. 1. Примеры отображения информационных слоев в ГИС «Арктика-М»

Информационная продукция и инструменты ее отображения в ГИС «Арктика-М»

На основе тематической обработки информации сканера МСУ-ГС (много-зональное сканирующее устройство гидрометеорологического обеспечения), входящего в состав бортовой целевой аппаратуры КА Арктика-М № 1, создается широкий спектр различных видов информационной продукции. В первую очередь это статичные и анимированные изображения облачности и подстилающей поверхности в различных диапазонах спектра, гидрометеорологические параметры и характеристики облачного покрова (высота и температура верхней границы облачности, тип и водозапас облачности и др.), данные о скорости ветра и осадках у земли и др.

Как показала практика совместной работы с региональными потребителями, спутниковая информация становится неотъемлемой частью в работе синоптиков, метеорологов, гидрологов, но еще большую информативность в данном случае приобретают инструменты, позволяющие проводить комплексный анализ спутниковых данных совместно с другими видами информации.

Для оценки обстановки в динамике в ГИС «Арктика-М» реализован сервис отображения информации об облачности в виде последовательности растровых изображений. Шкала выбора даты и времени позволяет просматривать движение облачных образований в режиме анимации. При этом предусмотрена возможность одновременного отображения в динамике и другой продукции, тесно связанной с облачностью, например, данных о грозовой активности, термобарического поля в изолиниях, распределения и фактической интенсивности осадков и порывов ветра у земли.

ГИС «Арктика-М» позволяет в максимально доступном виде реализовать самое главное назначение метеорологических спутников в условиях масштабных климатических изменений – обнаружение опасных метеорологических явлений. К примеру, одна из приоритетных задач оперативной метеорологии – прогнозирование возникновения полярных мезомасштабных (то есть имеющих размеры от нескольких до 2000 км) циклонов (ПМЦ), которые вызывают сильное волнение, ветер до 35 м/с, обледенение судов и сооружений, снежные заряды. При этом обычно ситуация развивается внезапно и очень быстро. На рисунке 2 представлен крайне необычный случай для начала осени – периода, который в арктическом регионе традиционно считается не характерным для формирования данных циклонов. На небольшом барическом возмущении 6 сентября 2022 г. сформировался полярный циклон в Гренландском море, который в дальнейшем под рядом факторов (адвекция воздушных масс, температура подстилающей поверхности и др.) через несколько суток трансформировался в циклон синоптического масштаба. Циклон преодолел достаточно большое расстояние (примерно 1500 км) и просуществовал необычайно долго, что не свойственно атмосферному явлению данного типа. Как показала практика, других аналогичных инструментов для выявления на ранней стадии зарождения ПМЦ, в синоптической практике нет, а численный прогноз, зачастую, не способен своевременно выяв-

лять атмосферные возмущения такого незначительного масштаба и непродолжительного цикла эволюции (в среднем 15 ч). В настоящее время НИЦ «Планета» ведет разработку базы данных анимированных изображений мезомасштабных циклонов, возникающих в Арктическом регионе.

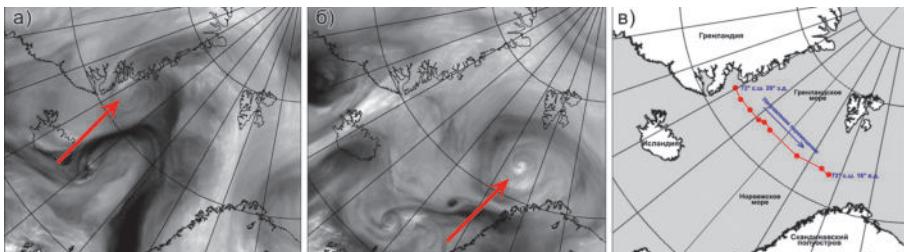


Рис. 2. Мониторинг формирования и развития полярного мезомасштабного циклона в ГИС «Арктика-М»: а) Изображение в канале 5,7–7,0 мкм 06.09.2022 20:00 UTC; б) Изображение в канале 5,7–7,0 мкм 08.09.2022 20:00 UTC; в) Карта траектории перемещения циклона с 06 по 08.09.2022

Применение в Дальневосточном центре НИЦ «Планета» технологий на основе искусственного интеллекта, в частности, нейронных сетей, позволило получить и визуализировать на платформе ГИС «Арктика-М» продукты, позволяющие осуществить распознавание облачных систем фронтального и внутримассового характера с конвективными явлениями (рис. 3) [4].

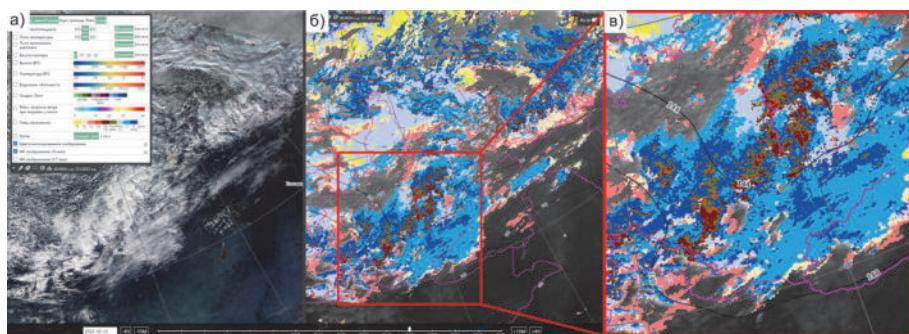


Рис. 3. Мониторинг облачных систем фронтального и внутримассового характера с конвективными явлениями в ГИС «Арктика-М»: а) Синтез каналов видимого диапазона за 13.10.2022 06:45 UTC; б) Карта классификации типов облакости с наложенным полем AT-700 мб за 13.10.2022 06:45 UTC; в) Укрупненный фрагмент карты

Технологии расчета основаны на моделировании взаимосвязи между интенсивностью осадков, спектральными и текстурными характеристиками облачности и ее некоторыми физическими характеристиками, такими как высота верхней границы облачности, ее оптическая толщина, эффективный радиус облачных частиц, фазовое состояние воды в облаке.

Стоит отметить, что веб-интерфейс ГИС «Арктика-М» разрабатывался для полярной стереографической проекции (ESRI:102018), однако он позволяет визуализировать продукты и проводить анализ и для средних широт, вплоть до 45° с.ш. Ввиду редкой сети наземных и практически полно отсутствии радиолокационных метеорологических наблюдений в Сибири и на Дальнем Востоке решалась задача достижения максимальной информативной ценности спутниковых продуктов для усвоения в оперативном анализе погоды, в частности, явлений конвективного характера. Обновляемые с периодичностью в 15 мин данные позволяют на единой платформе в динамике отследить потенциально опасную кучево-дождовую облачность на всех стадиях жизненного цикла, проанализировать микрофизические параметры конвективных ячеек и характер термобарического поля, сопоставить с данными фактически зарегистрированных молниевых вспышек. В существующих условиях получение качественных спутниковых информационных продуктов с КА Арктика-М № 1 в полярных широтах и на Дальнем Востоке позволит обеспечить подразделения Росгидромета продукцией, не уступающей по информационной ценности данным метеорологических радиолокаторов, но покрывающей на порядок большие площади.

Практическое использование ресурса ГИС «Арктика-М» на протяжении первого года эксплуатации показало, что такая платформа оказывает значительную помощь в осуществлении оперативного мониторинга синоптических процессов и являются надежным средством информационной поддержки прогностических подразделений, в том числе при составлении штормовых оповещений по территориям, слабо освещенным фактическими наблюдениями. На рисунке 4 представлена карта посещаемости ГИС «Арктика-М» пользователями.



Рис. 4. Карта посещаемости ГИС «Арктика-М» активными пользователями (количество http-запросов превышает 500 в неделю)

По состоянию на октябрь 2022 г. зарегистрировано 82 активных пользователя ГИС «Арктика-М» на территории 36 субъектов РФ. Получено 46 отзывов (комментариев, предложений) от организаций Росгидромета и ряда других заинтересованных структур. Помимо представленных примеров использования ГИС «Арктика-М», следует отметить, что модульная структура системы позволяет наращивать функциональность ГИС и включать в нее не только новые виды продукции, но и инструменты для работы с ними.

Заключение

Геоинформационная система «Арктика-М» предназначена для оперативного комплексирования и отображения на единой информационной площадке спутниковых продуктов, получаемых по данным первого в мире высокоэллиптического гидрометеорологического КА Арктика-М № 1. Система ориентирована на широкий круг пользователей, является универсальной и позволяет подготавливать, обрабатывать, хранить и визуализировать растровую и векторную информацию в различных картографических проекциях. Представленный в системе набор информационных продуктов, их территориальное покрытие, временной диапазон хранения информации и способ ее отображения могут подстраиваться под требования и задачи конкретного пользователя и устанавливаться администратором.

В ходе оперативной эксплуатации система продемонстрировала высокую эффективность работы за счет высокой достоверности информации, оперативности доведения продукции до конечных пользователей, большого количества отображаемых продуктов. Все это способствует повышению точности прогнозов и штормовых оповещений. Использование ГИС «Арктика-М» позволяет объединить в единую информационную систему данные из различных источников, которые дополняют друг друга и в целом представляют собой эффективное средство мониторинга и прогнозирования. Размещение подобных ресурсов в сети Интернет позволяет оперативно информировать как заинтересованные службы, так и население.

Список литературы

1. Первая в мире высокоэллиптическая гидрометеорологическая космическая система «Арктика-М» / В. В. Асмус, О. Е. Милехин, Л. С. Крамарева, М. Н. Хайлов, А. Е. Ширшаков, И. А. Шумаков // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 11–26.
2. Использование нейронных сетей в задачах гидрометеорологии / Л. С. Крамарева [и др.] // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 6. С. 50–59.
3. Симоненко Е. В., Чудин А. О., Давиденко А. Н. Дифференциальный метод вычисления векторов перемещения облачности // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 29–40.
4. Snow and cloud detection using a convolutional neural network and low-resolution data from the Electro-L No. 2 Satellite / V. D. Bloschchinskiy, M. O. Kuchma, A. I. Andreev, A. A. Sorokin // Journal of Applied Remote Sensing. 2020. Vol. 14, N 3. P. 034506.
5. GeoServer. URL: <https://geoserver.org/> (дата обращения: 18.10.2022).
6. OpenLayers. URL: <https://openlayers.org/> (дата обращения: 18.10.2022).

УДК 556.536

Анализ прохождения паводков на р. Ии в 2019 году с использованием гидравлической модели HEC-RAS

Е. Н. Сутырина, Т. И. Антонова

Иркутский государственный университет, Иркутск

Аннотация. Представлены результаты моделирования прохождения паводков на р. Ие в 2019 г. средствами HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) с использованием одномерной нестационарной гидравлической модели на конечно-разностном решении полных уравнений Сен-Венана. Описаны основные этапы работы с программным пакетом HEC-RAS. Для гидравлической модели приводится входная и выходная информация. Даются примеры пространственно-временного распределения глубин, полученные по результатам моделирования в различные сроки. Сопоставлены зоны затопления в пределах г. Тулун, оцененные по результатам моделирования, с зонами на основании анализа спутниковых снимков из сервиса PlanetScope за соответствующие даты. Приведен анализ требуемых доработок при подготовке геометрической модели водотока и назначении значений шероховатости.

Ключевые слова: Ия, Тулун, гидравлическая модель, цифровая модель местности, HEC-RAS.

Объект исследования – р. Ия – образуется слиянием рек Хиаи и Холбы. Ия стекает с северо-восточных склонов Восточного Саяна, продолжает течение по территории Иркутской области (рис. 1) и впадает в Иннский залив Братского водохранилища. В верховьях река имеет горный характер, ниже долина водотока расширяется, течение становится спокойным. Площадь водосбора р. Ии в створе гидрологического поста в г. Тулун составляет 14 500 км² (рис. 1). Режим р. Ии характеризуется весенне-летними половодьями, высокими летними дождевыми паводками и малым зимним стоком. Самые многоводные месяцы, на которые приходится почти 60 % годового речного стока – это июнь – август [2–4; 7]. На р. Ие неоднократно происходили наводнения, в том числе в 1984, 2006 и 2019 гг. В 2019 г. наблюдалось выдающееся за инструментальный период измерения повышение уровня воды на посту р. Ия – г. Тулун до 1389 см.

Цель исследования заключается в использовании гидравлической модели HEC-RAS для анализа прохождения паводков на р. Ии в пределах г. Тулун в 2019 г. Выбор года для моделирования обусловлен с одной стороны наличием исторического максимума в указанном году – с одной стороны, с другой – наличие спутниковых снимков [1; 4; 6], позволяющих детектировать область затопления в различные даты в 2019 г., что позволяет произвести параметризацию модели.

Программное обеспечение HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) (рис. 2) широко применяется для гидравлического моделирования потоков в открытых руслах и моделирования профилей водной поверхности. Программный комплекс реализует различные подходы к гидравлическому моделированию речных потоков и включает в себя графический интерфейс, компоненты гидравлического анализа, хранения и управления данными. В текущую версию программы HEC-RAS входит четыре расчетных модуля, позволяющих

моделировать потоки при установившемся и неустановившемся движении, моделировать транспорт наносов в деформируемых руслах и моделировать транспорт поллютантов в водных потоках.

Одномерная модель для нестационарного течения в программе HEC-RAS основана на конечно-разностном решении полных уравнений Сен-Венана сохранения массы и импульса. Модель решает уравнения, используя четырехточечную неявную конечно-разностную схему, разработанную для русел.

Модель способна обрабатывать переходы потока в докритических и сверхкритических условиях. В модели также может использоваться смешанный режим течения. Модель может быть сконфигурирована для различных гидротехнических сооружений, таких как водопропускные трубы, мосты, закрытые водобросы, переливные водосливы, водосливы (шлюзовые или радиальные, широкие, остроугольные или остроконечные) и подпорные сооружения [8].



Рис. 1. Водосбор р. Ии в створе поста в г. Тулун [6]

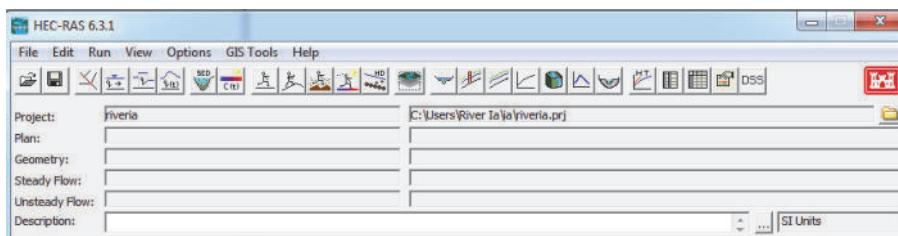


Рис. 2. Общая панель программного комплекса HEC-RAS

HEC-RAS находит особое практическое применение в исследованиях для оценки последствий наводнений и для оценки зон затопления.

Одними из наиболее важных входных данных для гидравлической модели HEC-RAS являются данные о рельефе, определяющие геометрических характеристики русла и поймы реки. Для создания геометрической модели долины исследуемого водотока была использована цифровая модель местности (ЦММ) Copernicus Global DSM 90m (рис. 3.), полученная с геопортала OpenTopography [5].

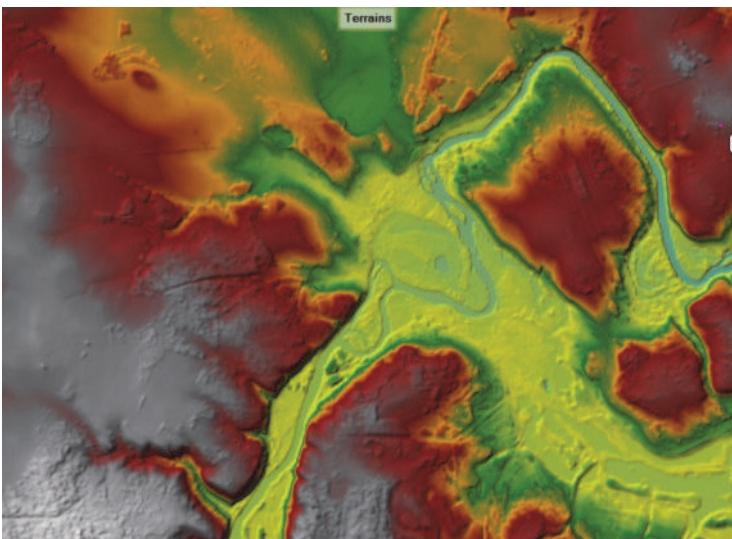


Рис. 3. Цифровая модель местности Copernicus Global DSM 90m, загруженная в HEC-RAS

Для создания геометрической модели долины реки требуется задать осевую линию р. Ии, границы и сечения (рис. 4), назначить шероховатость в сечениях, которая может быть назначена или одинаковой в пределах сечения, или иметь различные значения.

За этим следует ввод в программу рядов расходов воды р. Ии за 2019 г. и настройка параметров модели.

Следующий этап – выбор расчетных интервалов для моделирования (в работе выбран интервал – раз в 20 мин).

В HEC-RAS реализован ГИС-модуль для отображения графических результатов моделирования. На рис. 5 представлены результаты моделирования с отображением зон затопления и распределением глубин по состоянию на 29.06.2019, 01.07.2019 и 03.07.2019 в сопоставлении со спутниковыми снимками из ресурса PlanetScope за те же даты [1].

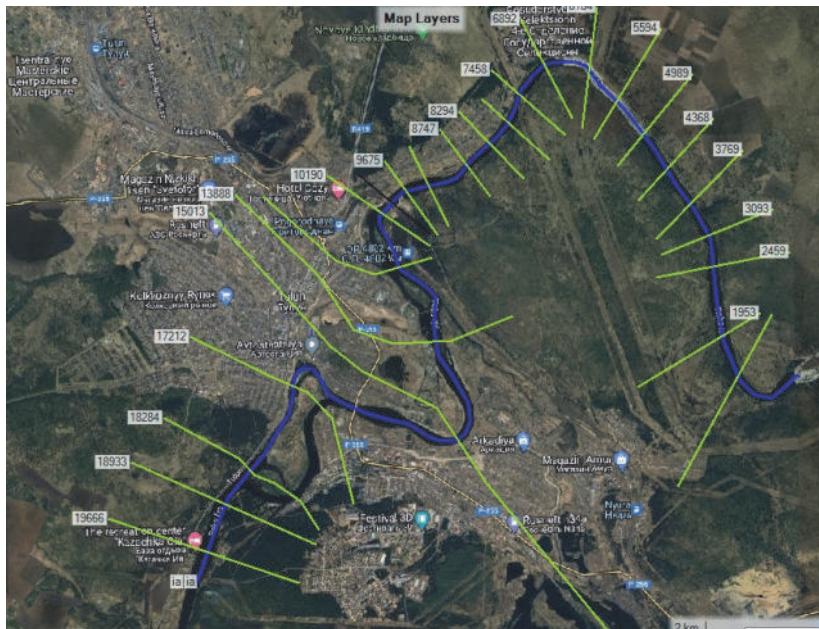


Рис. 4. Построение геометрической модели долины р. Ии

Границы зон затопления на приведенных снимках и по результатам моделирования (см. рис. 5) хорошо соотносятся друг с другом, но имеются и расхождения:

- не совсем точно отображена зона затопления в районе Ручейного переулка;
- на пересечении ул. Гидролизная и ул. Горького;
- около карьеров;
- в районе моста и железнодорожной станции и около берегов р. Ии.

Источники ошибок лежат в необходимости при подготовке геометрической модели принимать во внимание мостовые переходы, которые создают местный подпор в местах пересечения водотока [2] и должны быть учтены при моделировании потоков. Данные корректировки можно внести средствами самого программного пакета HEC-RAS. Кроме этого, необходимо назначать величину коэффициента шероховатости не единым значением для каждого поперечника, как это было сделано в работе, а асигновать значения в зависимости от состояния поймы и русла – дифференцировано по сечениям. Это и будет рассматриваться в продолжении данного исследования.

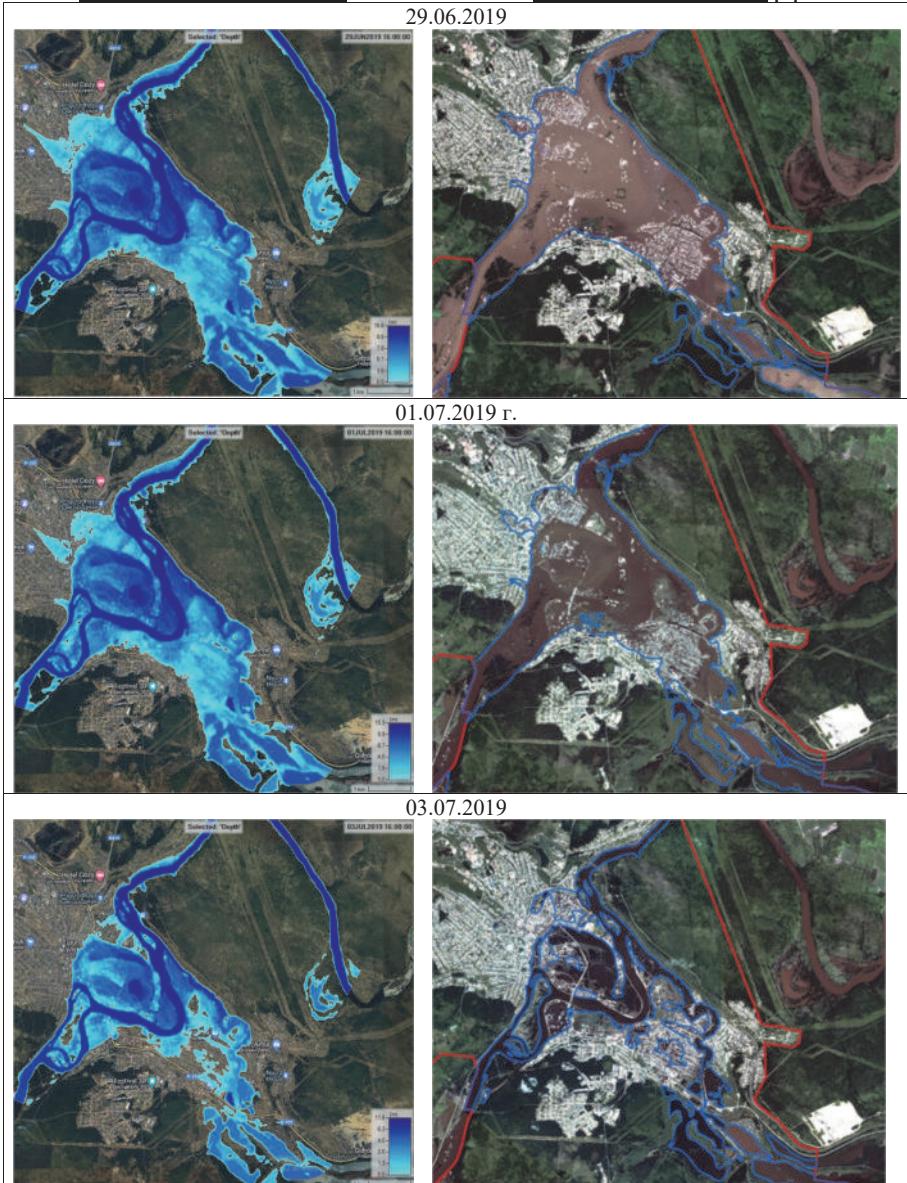
Результат моделирования**Снимки из PlanetScope [1]**

Рис. 5. Границы зоны затопления г. Тулуна и распределение глубин (м) по результатам моделирования в сопоставлении со спутниковыми снимками из сервиса PlanetScope (синей линией на снимках отмечен контур затопления, красной – административные границы г. Тулуна)

Список литературы

1. ТерраTex. Космический мониторинг паводка в г. Тулуне. URL: <https://terratech.ru/news/Tulune.pdf> (дата обращения: 15.10.2022)
2. Estimates of Peak Flow of the Iya River during the Extreme Flood in 2019 / M. V. Bolgov, E. A. Korobkina, N. V. Osipova, I. A. Filippova // Russian Meteorology and Hydrology. 2020. V. 45. Iss. 11. P. 783–790. <https://doi.org/10.3103/S1068373920110059>.
3. Modelling maximum discharge of the catastrophic flood at the Iya River (Irkutsk region, Russia) in 2019 / A. Fedorova, O. Makarieva, N. Nesterova, A. Shikhov, T. Vinogradova // E3S Web of Conferences: IV Vinogradov Conference “Hydrology: from Learning to Worldview” in Memory of Outstanding Russian Hydrologist Yury Vinogradov. 2020. Vol. 163, N 01004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016301004IV>
4. Kalugin A. Process-Based Modeling of the High Flow of a Semi-Mountain River under Current and Future Climatic Conditions: A Case Study of the Iya River (Eastern Siberia) // Water. 2021. Vol. 13, N 1042. <https://doi.org/10.3390/w13081042>.
5. OpenTopography. URL: <https://opentopography.org> (дата обращения: 15.10.2022)
6. Sutyrina E. N., Antonova T. I. SRTM Data Application for Extrapolation of Rating Curves (On the Example of the Iya River at the Tulun Gauge) // The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences. 2022. Vol. 41. P. 140–150. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2022.41.140>.
7. Tsygankova M. V. Landscape structure of the Iya river basin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 629, N 012054 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/629/1/012054>.
8. Wara C., Thomas M., Mwakurya S., Katuva J. Development of River Rating Curves for Simple to Complex Hydraulic Structure Based on Calibrated HEC-RAS Hydraulic Model, in Kwale, Coastal Kenya // J. of Water Resource and Protection. 2019. Vol. 11. P. 468–490. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.114028>.

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ В РОССИИ

*Материалы
V Всероссийской научно-практической конференции
Иркутск, 23–25 ноября 2022 г.*

ISBN 978-5-9624-2119-3

*Материалы публикуются в авторской редакции
Дизайн обложки: П. О. Ершов*

Темплан 2023. Поз. 4
Уч.-изд. 23,5

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИГУ
664082, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 124